

GLÓWNY INSTYTUT GÓRNICZWA  
Zakład Geologii, Geofizyki i Ochrony Powierzchni



Rozprawa doktorska

*Analiza obniżeń powierzchni na terenach górniczych i pogórnicznych  
w aspekcie zasięgu i czasu z wykorzystaniem interferometrii  
satelitarnej*

mgr inż. Bartosz Apanowicz

Promotorzy:

dr hab. inż. Andrzej Kowalski, prof. GIG

dr hab. inż. Wojciech Milczarek, prof. PWr

Katowice, 2023



*Co my wiemy, to tylko kropelka. Czego nie wiemy to cały ocean.*

Isaac Newton

Serdeczne podziękowania składam promotorom pracy: Panu dr hab. inż. Andrzejowi Kowalskiemu, prof. GIG oraz Panu dr hab. inż. Wojciechowi Milczarkowi, prof. PWr, za opiekę naukową i cenne rady udzielone podczas realizacji pracy.

Dziękuję również Koleżankom i Kolegom z Zakładu Geologii, Geofizyki i Ochrony Powierzchni w GIG oraz Żonie Karolinie i Synowi Mikołajowi za wsparcie i mobilizację w trakcie realizacji niniejszej pracy.



## Streszczenie

Jednym ze skutków podziemnej eksploatacji górniczej są powstające na powierzchni deformacje, które mają wpływ na bezpieczeństwo użytkowania terenów górniczych i pogórnich. W związku z tym zakłady górnicze monitorują ruchy powierzchni terenu w celu identyfikacji powstałych deformacji, ich zasięgu oraz czasu ich zanikania po zakończeniu eksploatacji. Obecnie odbywa się to z wykorzystaniem klasycznych metod geodezyjnych.

W ostatnich latach coraz większą popularność zyskują metody satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR), które również z powodzeniem są szeroko wykorzystywane do obserwacji ruchów powierzchni ziemi powstałych na skutek eksploatacji górniczej. Jak wszystkie techniki pomiarowe, metody InSAR posiadają również ograniczenia takie jak możliwość wykrywania przemieszczeń o gradiencie mniejszym niż połowa fali elektromagnetycznej zastosowanej w wykorzystywanym radarze. Konsekwencją tego ograniczenia jest fakt, że wyznaczone przemieszczenia powierzchni terenu metodami InSAR są w wielu miejscach niedoszacowane.

Celem pracy była adaptacja metod InSAR do wykrywania dużych obniżień powierzchni, które w pracy zdefiniowano jako te które przekraczają 1000 mm, i które ujawnią się na powierzchni w ciągu 12 miesięcy, w warunkach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) oraz do identyfikacji ich zasięgu na terenach górniczych i czasu ich zanikania na terenach pogórnich. Badania przeprowadzono na obszarze GZW w ośmiu wybranych lokalizacjach. Siedem rejonów badawczych zlokalizowanych było na terenach górniczych czynnych kopalń węgla kamiennego i jeden na terenie pogórnym filara ochronnego śródmieścia Bytomia. W badaniach wykorzystano zobrażenia SAR pochodzące z Europejskiej konstelacji satelitów radarowych Sentinel-1A/1B, na podstawie których wyznaczono ruchy powierzchni terenu metodami szeregów czasowych SBAS i PSInSAR. Do weryfikacji otrzymanych wyników posłużyły obniżenia powierzchni zmierzone klasycznymi metodami geodezyjnymi.

W kontekście możliwości wykrywania dużych deformacji metodami InSAR wykazano, że niedoszacowanie wyników otrzymanych z przetwarzania zobrażeń SAR metodami InSAR jest wprost proporcjonalne do gradientu obniżania się powierzchni. Na podstawie wykazanej zależności opracowano nowatorską metodę identyfikacji dużych obniżień z wykorzystaniem metody SBAS, którą nazwano metodą zależności liniowych. W oparciu o klasyczne pomiary geodezyjne dokonano walidacji metody, która wykazała w sposób

ilościowy i jakościowy jej przydatność do wykrywania dużych obniżeń powierzchni terenu metodami InSAR.

Badania zasięgu deformacji górniczych doprowadziły do opracowania metody jego wyznaczania z wykorzystaniem interferometrii satelitarnej. W oparciu o opracowaną metodę określono średni zasięg deformacji górniczych w GZW równy  $1,16H \pm 0,22H$  gdzie  $H$  oznacza średnią głębokość eksploatowanego pokładu. W kontekście czasu zanikania deformacji po zakończeniu eksploatacji opracowano metodę wyznaczania współczynnika czasu  $c$  w funkcji Knothego z wykorzystaniem InSAR. Udowodniono, że wykorzystanie metod InSAR pozwala na dokładniejsze określenie współczynnika czasu, a w związku z tym również na dokładniejsze określenie czasu od zakończenia eksploatacji w jakim będą się jeszcze ujawniać deformacje powierzchni. Ponadto, analiza w długim horyzoncie czasu wykazała występowanie deformacji resztkowych (rezydualnych).

Przeprowadzone badania pozwoliły na osiągnięcie postawionych celów i udowodnienie tezy pracy. Rezultaty pracy mogą być wykorzystane w zakresie ochrony powierzchni terenów górniczych i pogórniczych.

## Abstract

One of the effects of mining exploitation are deformations on the surface, which affects the safety of mining and post-mining areas. Therefore, mining plants to monitor surface movements in order to identify the deformations, their range and their decay time after the end of mining exploitation. Currently, monitoring of deformations is done with using classical surveying methods.

In recent years, the methods of satellite radar interferometry (InSAR) are gaining in popularity, which are also successfully used to observe movements of the earth's surface caused by mining exploitation. All measurement techniques have limitations. InSAR methods also have limitations, such as the ability to detect displacements with a gradient less than half of the electromagnetic wave used in the radar. The consequence of this limitation is the fact that the displacements of the surface determined by InSAR methods are in many places underestimated.

The aim of the work was to adapt the InSAR methods to detect large surface subsidence, which were defined in the work as those that exceed 1000 mm, and which will reveal on the surface within 12 months, in the conditions of the Upper Silesian Coal Basin (USCB) and to identify their range in mining areas and their decay time in post-mining areas. The research was carried out in the area of the USCB in eight selected locations. Seven research areas were located in the mining areas of active hard coal mines and one in the post-mining area of the protective pillar of the city center of Bytom. SAR images from the European constellation of Sentinel-1A/1B radar satellites were used in the research. The movements of the surface were determined using the SBAS and PSInSAR time series methods. Surface subsidence measured with classical surveying methods were used to verify the obtained results.

In the context of the possibility of detecting large deformations with the InSAR methods, it was shown that the underestimation of the results obtained from the processing of SAR images with the InSAR methods is directly proportional to the velocity of the surface subsidence. Based on the demonstrated relationship, an innovative method for identifying large subsidence using the SBAS method was developed. The method was called the method of linear relationships. Based on classical surveying measurements, the method was validated. The validation proved in a quantitative and qualitative way its suitability for detecting large subsidence of the land surface using InSAR methods.

The research of the range of mining deformations led to the development of a method for its determination using satellite radar interferometry. Based on the developed method, the average range of mining deformations in the USCB was determined to be  $1.16H \pm 0.22H$ , where

$H$  is the average depth of the seam. In the context of the deformations decay time after the end of mining exploitation, a method for determining the time coefficient  $c$  in the Knothe function using InSAR was developed. It has been proven that the use of InSAR methods allows for a more accurate determination of the time coefficient. Therefore also for a more accurate determination of the time from the end of mining exploitation in which surface deformations will still be revealed. In addition, the long-term analysis showed the occurrence of residual deformations.

The research carried out allowed to achieve the set goals and prove the thesis of the work. The results of the work can be used in the protection of the surface of mining and post-mining areas.



# Spis treści

Spis symboli .....	11
<b>1. Wprowadzenie.....</b>	<b>15</b>
<b>2. Charakterystyka problemu badawczego .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1. Problem wykrywania dużych deformacji.....</b>	<b>18</b>
<b>2.2. Problem czasu zanikania i zasięgu deformacji górniczych.....</b>	<b>22</b>
<b>3. Stan wiedzy dotyczący problemu badawczego .....</b>	<b>24</b>
<b>3.1. Deformacje górnicze.....</b>	<b>24</b>
3.1.1. <i>Geneza deformacji i ich opis .....</i>	24
3.1.2. <i>Prognozowanie deformacji .....</i>	26
3.1.3. <i>Zasięg deformacji górniczych .....</i>	27
3.1.4. <i>Zanikanie deformacji po zakończeniu eksploatacji.....</i>	30
<b>3.2. Interferometria satelitarna .....</b>	<b>32</b>
3.2.1. <i>Podstawy interferometrii satelitarnej.....</i>	32
3.2.2. <i>Metody przetwarzania zobrażeń satelitarnej SAR.....</i>	39
<b>3.3. Podsumowanie .....</b>	<b>41</b>
<b>4. Identyfikacja rejonów badawczych .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1. Górnośląskie Zagłębie Węglowe.....</b>	<b>43</b>
4.1.1. <i>Informacje ogólne .....</i>	43
4.1.2. <i>Zarys warunków geologicznych .....</i>	44
4.1.3. <i>Zarys warunków górniczych.....</i>	45
4.1.4. <i>Charakterystyka rejonów badawczych .....</i>	46
4.1.4.1. <i>Wprowadzenie .....</i>	46
4.1.4.2. <i>KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast, rejon Bierunia Nowego.....</i>	47
4.1.4.3. <i>KWK Bobrek – Piekary Ruch Bobrek, dzielnica Miechowice w Bytomiu.....</i>	48
4.1.4.4. <i>ZG EKO – PLUS Sp. z o. o., rejon autostrady A1 w Bytomiu.....</i>	50
4.1.4.5. <i>KWK ROW Ruch Marcel, Markłowice.....</i>	52
4.1.4.6. <i>KWK Ruda Ruch Pokój (obecnie SRK Oddział KWK Pokój I – Pokój II), dzielnica Wirek w Rudzie Śląskiej .....</i>	54
4.1.4.7. <i>KWK Ruda Ruch Halemba, dzielnica Halemba w Rudzie Śląskiej.....</i>	56
4.1.4.8. <i>KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka, Jastrzębie Zdrój, rejon ul. Pszczyńskiej (DW933).....</i>	57
<b>4.2. Filar ochronny Śródmieścia Bytomia .....</b>	<b>59</b>
4.2.1. <i>Informacje ogólne .....</i>	59
4.2.2. <i>Zarys warunków geologicznych i górniczych.....</i>	60
4.2.3. <i>Odwadnianie górotworu .....</i>	61
4.2.4. <i>Deformacje powierzchni .....</i>	62
<b>5. Charakterystyka zastosowanych metod badawczych oraz analiza otrzymanych wyników .....</b>	<b>65</b>
<b>5.1. Przetwarzanie zobrażeń SAR metodą SBAS .....</b>	<b>65</b>
5.1.1. <i>Opis metody.....</i>	65

5.1.2.	<i>Metodyka obliczeń przeprowadzonych metodą SBAS</i> .....	66
5.1.3.	<i>Analiza wyników otrzymanych z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS</i> .....	69
5.1.4.	<i>Walidacja wyników otrzymanych z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS</i> .....	70
<b>5.2.</b>	<b>Przetwarzanie obrazów SAR metoda PSInSAR</b> .....	82
5.2.1.	<i>Opis metody</i> .....	82
5.2.2.	<i>Metodyka obliczeń przeprowadzonych metodą PSInSAR</i> .....	84
5.2.3.	<i>Analiza wyników otrzymanych z przetwarzania obrazów SAR metodą PSInSAR</i> .....	87
5.2.4.	<i>Walidacja wyników otrzymanych z przetwarzania obrazów SAR metodą PSInSAR</i> .....	91
<b>6.</b>	<b>Wyznaczanie dużych obniżen z zastosowaniem pomiarów InSAR - SBAS</b> .....	96
6.1.	<b>Analiza zależności pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a niedoszacowaniem wyników InSAR - SBAS</b> .....	96
6.2.	<b>Wyznaczanie dużych deformacji metodą zależności liniowych</b> .....	102
6.2.1.	<i>Opis metody</i> .....	102
6.2.2.	<i>Walidacja metody zależności liniowych</i> .....	106
6.3.	<b>Podsumowanie</b> .....	113
<b>7.</b>	<b>Określenie zasięgu deformacji górniczych</b> .....	115
7.1.	<b>Opis metodyki wykorzystanej do określenia zasięgu deformacji górniczych</b> ..	115
7.1.1.	<i>Określenie błędów otrzymanych wyników obniżen</i> .....	115
7.1.2.	<i>Korygowanie asymetrii wpływów względem pola eksploatacyjnego</i> .....	116
7.1.3.	<i>Pierwsza filtracja danych</i> .....	119
7.1.4.	<i>Druga filtracja danych kolejnymi przybliżeniami</i> .....	122
7.1.5.	<i>Podsumowanie metodyki</i> .....	123
7.2.	<b>Wyniki badań</b> .....	125
<b>8.</b>	<b>Czas zanikania deformacji na terenach pogórnicznych</b> .....	129
8.1.	<b>Analiza zanikania deformacji w oparciu o pomiary geodezyjne</b> .....	129
8.2.	<b>Analiza zanikania deformacji w oparciu o pomiary InSAR</b> .....	139
8.2.1.	<i>Opis metody wyznaczania współczynnika czasu <math>c</math> z pomiarów InSAR</i> .....	139
8.2.2.	<i>Określenie teoretycznego czasu zanikania deformacji w oparciu o pomiary InSAR</i> .....	153
8.3.	<b>Analiza porównawcza wyników uzyskanych na podstawie pomiarów geodezyjnych i pomiarów InSAR</b> .....	154
<b>9.</b>	<b>Wnioski</b> .....	159
	<b>Bibliografia</b> .....	161
	<b>Spis załączników</b> .....	174
	<b>Spis rysunków</b> .....	174

## Spis symboli

- $A$  – rozmiar piksela w kierunku azymutu,  
 $B_n$  – prostopadła linia bazowa,  
 $B_t$  – czasowa linia bazowa,  
 $B_{\perp c}$  – wartość krytyczna linii bazowej,  
 $c$  – współczynnik czasu,  
 $d, s$  – przemieszczenie względne w kierunku LOS,  
 $d_{asc}$  – przemieszczenie względne w kierunku LOS wyznaczone ze ścieżki wstępującej (ascending),  
 $d_{desc}$  – przemieszczenie względne w kierunku LOS wyznaczone ze ścieżki opadającej (descending),  
 $d_{EW}$  – przemieszczenie względne w kierunku wschód – zachód (E – W),  
 $d_V$  – przemieszczenie względne pionowe,  
 $d_{max}$  – maksymalny wykrywalny gradient deformacji metodami InSAR,  
 $D_A$  – dyspersja amplitudy sygnału,  
 $E$  – wartość oczekiwana koherencji,  
 $H, H_k$  – głębokość eksploatacji/miąższość warstw karbońskich,  
 $k$  – współczynnik dewiacji wpływów,  
 $K$  – krzywizna powierzchni terenu,  
 $l$  – rozmiar piksela,  
 $L$  – zasięg wpływów eksploatacji,  
 $L(H)$  – zasięg wpływów eksploatacji odniesiony do głębokości eksploatowanego pokładu,  
 $L_{sr}(H)$  – średni zasięg wpływów eksploatacji odniesiony do głębokości eksploatowanego pokładu,  
 $\sigma L(H)$  – odchylenie standardowe zasięgu wpływów eksploatacji odniesione do głębokości eksploatowanego pokładu,  
 $\Delta L$  – przesunięcie zasięgu wpływów z uwagi na nachylenie pokładu,  
 $L_0$  – długość ciągu obserwacyjnego,  
 $L_i$  – długość ciągu obserwacyjnego w sieci dla  $i$ -tego punktu,  
 $m_{hi}$  – średni błąd wyznaczonej wysokości punktu,  
 $m_1$  – średni błąd kilometrowy w ciągu dowiązanym,  
 $m_2$  – średni błąd kilometrowy w sieci obserwacyjnej,  
 $\Delta n$  – składnik szumów i dekorrelacji,

$p$  – asymetria wpływów/obrzeże eksploatacyjne; całkowita liczba pomiarów w cyklu,  
 $q$  – różnica wysokości między obiektem, a poziomą płaszczyzną odniesienia,  
 $q_s$  – odległość pomiędzy obiektem na jednym i drugim zobrazowaniu satelitarnym,  
 $r$  – promień zasięgu wpływów/parametr rozproszenia wpływów w teorii Knothego –  
 Budryka (dotyczy deformacji); rozmiar piksela w kierunku zakresu (dotyczy InSAR),  
 $\Delta r$  – różnica odległości mierzonego obiektu od jednej oraz drugiej satelity lub od tej samej  
 satelity znajdującej się w różnych pozycjach,  
 $\Delta r_{12}$  – różnica odległości mierzonego obiektu od jednej oraz drugiej satelity lub od tej  
 samej satelity znajdującej się w różnych pozycjach podczas pierwszego i drugiego  
 przejścia,  
 $\Delta r_n$  – różnica odległości mierzonego obiektu od jednej oraz drugiej satelity lub od tej samej  
 satelity znajdującej się w różnych pozycjach podczas n-tego przejścia,  
 $R$  – promień krzywizny powierzchni terenu (dotyczy deformacji); odległość od  
 satelity do mierzonego obiektu (dotyczy InSAR),  
 $R_1$  – pierwsza zmierzona odległość od satelity do mierzonego obiektu,  
 $R_2$  – druga zmierzona odległość od satelity do mierzonego obiektu,  
 $R_n$  – n-ta zmierzona odległość od satelity do mierzonego obiektu,  
 RMSE – pierwiastek błędu średniokwadratowego,  
 $s$  – przesunięcie obiektu w zakresie skośnym,  
 $t$  – czas,  
 $t_n$  – czas początkowy,  
 $\Delta t$  – różnica czasu przejścia satelity,  
 $t_A, t_1$  – czas pierwszego przejścia satelity,  
 $t_B, t_2$  – czas drugiego przejścia satelity,  
 $t_n$  – czas n-tego przejścia satelity,  
 $\text{tg}\beta$  - parametr górotworu w teorii Knothego – Budryka,  
 $T$  – nachylenie powierzchni,  
 $T_{\max}$  – maksymalne nachylenie powierzchni terenu,  
 $u$  – przemieszczenia poziome powierzchni terenu,  
 $v_1, v_2$  – sygnały dwóch zobrazowań satelitarnych,  
 $v$  – prędkość obniżania się powierzchni terenu,  
 $w$  – obniżenie powierzchni terenu,  
 $w_{\max}$  – maksymalne obniżenie powierzchni terenu,

$\Delta w$  – wartość zaniku przyrostów obniżeń po zakończeniu eksploatacji; różnica pomiędzy obniżeniami zmierzonymi klasycznymi metodami geodezyjnymi, a otrzymanymi z przetwarzania obrazów SAR metodami InSAR  
 $w_{as}$  – wartość spodziewanych obniżeń asymptotycznych po zakończeniu eksploatacji,  
 $w_{GEOD}$  – obniżenia zmierzone klasycznymi metodami geodezyjnymi,  
 $w_{SBAS}$  – obniżenia wyznaczone z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS,  
 $W$  – operator zwiniętej fazy,  
 $\bar{x}$  – wartość średnia,  
 $y$  – liczba zespolona zawierająca informacje o fazie i amplitudzie sygnału,  
 $\Delta z$  – błąd topografii terenu,  
 $\alpha$  – kąt nachylenia pokładu (dotyczy deformacji); kąt pomiędzy orbitą po której porusza się satelita, a kierunkiem północy (dotyczy InSAR),  
 $\gamma$  – koherencja obrazów satelitarnych,  
 $\varepsilon$  – odkształcenie poziome powierzchni terenu,  
 $\varepsilon_{max}$  – maksymalne odkształcenie powierzchni terenu,  
 $\zeta$  – nachylenie terenu (dotyczy InSAR),  
 $\theta$  – kąt padania sygnału satelity,  
 $j$  – amplituda sygnału,  
 $\lambda$  – długość fali elektromagnetycznej,  
 $\mu_A$  – wartość średnia amplitudy sygnału,  
 $\sigma$  – odchylenie standardowe,  
 $\sigma_c$  – odchylenie standardowe współczynnika czasu,  
 $\sigma_A$  – odchylenie standardowe amplitudy sygnału,  
 $\varphi$  – faza sygnału,  
 $\Delta\varphi$  – faza interferometryczna,  
 $\Delta\varphi_{topo}$  – przesunięcie fazy związane z topografią terenu,  
 $\Delta\varphi_{defo}$  – przesunięcie fazy związane z deformacjami terenu,  
 $\Delta\varphi_{ref}$  – składnik referencyjny systemu determinowany wysokością,  
 $\Delta\varphi_{subpx}$  – różnica między zakładanym centrum fazy, a jej aktualną pozycją,  
 $\Delta\varphi_{orb}$  – przesunięcie fazowe związane z niedokładnością orbitalną,  
 $\Delta\varphi_{atm}$ ,  $\varphi_{atm}$  – przesunięcie fazowe związane z opóźnieniami atmosferycznymi,  
 $\Delta\varphi_{scat}$  – przesunięcie fazowe związane z właściwościami rozpraszania obrazu,  
 $\Delta\varphi_{noise}$  – przesunięcie fazowe związane z szumem fazowym.



# 1. Wprowadzenie

Każda podziemna eksploatacja górnicza ma wpływ na powierzchnię terenu i powoduje degradację środowiska naturalnego. Jednym z jej skutków jest występowanie deformacji ciągłych w postaci niecek obniżeniowych lub deformacji nieciągłych w postaci szczelin i stopni oraz struktur z nich złożonych (Kowalski 2020). W celu zapewnienia bezpieczeństwa na powierzchni terenu, zakłady górniczne zobligowane są do stałego monitorowania deformacji powierzchni, które mają związek z działalnością górniczną (Prawo geologiczne ... 2011). Dotychczas monitoring deformacji był wykonywany pomiarami geodezyjnymi z wykorzystaniem klasycznych metod takich jak niwelacja, tachimetria lub pomiary satelitarne GNSS (ang. *Global Navigation Satellite System*). W ostatnich latach, popularność w tym zakresie zyskuje również metoda interferometrii satelitarnej (ang. *Interferometry SAR, InSAR*).

InSAR jest metodą pomiarową wykorzystywaną od lat 90-tych ubiegłego wieku. Z powodzeniem znajduje zastosowanie w obserwacji ruchów lodowców (Milczarek i in. 2022), ruchów spowodowanych wybuchami wulkanów (Anderson, Poland 2016) lub trzęsieniami ziemi (Suresh, Yarrakula 2019). Może również służyć do oceny skutków powodzi (Chaabani i in. 2018). Rozwój metod InSAR na przestrzeni lat oraz dostępność zobrażeń satelitarnych spowodowała, że znajdują one również coraz szersze zastosowanie w monitorowaniu ruchów wywołanych podziemną eksploatacją górniczną rud miedzi (Cieślik, Milczarek 2022) i węgla kamiennego (Hay-Man i in. 2010).

Każdy pomiar obarczony jest błędami. Nie ma idealnych metod pomiarowych możliwych do wykorzystania bez ograniczeń. W metodach InSAR, maksymalny wykrywalny gradient deformacji jest równy połowy zastosowanej długości fali, która zależy od stosowanego sensora (Massonet, Fiegl 1998). W przypadku dużych deformacji, przekraczających ten gradient, zachodzi zjawisko niejednoznaczności fazy i aliasingu fazy co powoduje niedoszacowanie końcowych rezultatów. Były już podejmowane próby rozwiązania tego problemu między innymi przez Pawluszek-Filipiak i Borkowskiego (2020) lub Jiang'a i zespół (2021). W pierwszym przypadku udało się wykryć obniżenie wynoszące około 90 cm w ciągu 22 miesięcy, a w drugim zastosowano integrację InSAR z modelem prognostycznym Boltzmanna, który obarczony jest niepewnością, a wyniki zależą od przyjętych parametrów. Autor poprzez duże deformacje rozumie obniżenia przekraczające 1 m/rok, które wynikają z uwarunkowań geologiczno-górnicznych i wielkości obniżeń obserwowanych w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym (GZW). Analiza literatury wykazała, że brak jest jednoznacznego, potwierzonego w praktyce rozwiązania dotyczącego wykrywania obniżeń większych od 1

m/rok z wykorzystaniem metod InSAR. **Jednym z celów pracy jest przedstawienie problemu i jego rozwiązanie.**

Dotychczasowa wiedza na temat deformacji górniczych, ich zasięgu i czasu zanikania po zakończeniu eksploatacji, bazuje na klasycznych pomiarach geodezyjnych. Jak wiadomo, pomiary geodezyjne mają ograniczenia zarówno w przestrzeni jak i w czasie. Wykonywane są na liniach pomiarowych lub punktach rozproszonych, a na pozostałym obszarze wpływy muszą być ekstrapolowane. W przypadku badania i określania czasu zanikania deformacji na terenach górniczych i pogórnicych, klasyczne pomiary geodezyjne są najczęściej kończone wraz z zakończeniem eksploatacji i/lub likwidacją zakładu górniczego. Zatem, w tym zakresie, wiedza dotycząca tego zjawiska jest ograniczona z powodu braku wiarygodnych danych. W związku z powyższym, **kolejnymi celami pracy było wykorzystanie metod InSAR do wyznaczania zasięgu oraz czasu zanikania deformacji, wyrażonych przez obniżenia powierzchni**, ze względu na przestrzenny charakter interferometrii satelitarnej i częstotliwość wykonywania pomiarów. InSAR umożliwia pozyskanie informacji o ruchach powierzchni w siatce punktów rozłożonych w odległościach do kilkunastu metrów, z częstotliwością nawet 6 dni. Przemieszczenia powierzchni na obrzeżach niecki obniżeniowej oraz po zakończeniu eksploatacji mogą być bardzo małe, rzędu kilkunastu, a nawet kilku milimetrów. Należy zatem podkreślić, że metody InSAR umożliwiają ich wykrywanie.

Podsumowując, można stwierdzić, że cele niniejszej pracy są następujące:

Cel naukowy:

*Adaptacja metod InSAR do wykrywania dużych obniżeń powierzchni w warunkach GZW, a także wyznaczania zasięgu i czasu zaniku deformacji*

Cel użytkowy:

*Wyznaczenie deformacji (obniżeń) powierzchni oraz granic zasięgu i czasu zaniku deformacji powierzchni na terenach górniczych i pogórnicych z wykorzystaniem metod InSAR, a także ich weryfikacja na podstawie klasycznych pomiarów geodezyjnych.*

W nawiązaniu do powyższych celów, teza pracy jest następująca:

*Metody interferometrii satelitarnej pozwalają na wyznaczanie dużych obniżeń powierzchni powstałych na skutek eksploatacji górniczej prowadzonej w warunkach GZW oraz na określanie granic zasięgu i czasu zaniku deformacji powierzchni na terenach górniczych i pogórnicych.*



Praca zawiera 9 rozdziałów. W pierwszych 4 rozdziałach szczegółowo przedstawiono badany problem oraz scharakteryzowano dotychczasową wiedzę zarówno z obszaru deformacji górniczych jak również interferometrii satelitarnej. Przedstawiono także charakterystykę rejonów badawczych. W rozdziałach 5 i 6 opisano zastosowane metody przetwarzania obrazów SAR wraz z analizą otrzymanych wyników. Szczegółowo scharakteryzowano również nową metodę wyznaczania dużych obniżen powierzchni metodami InSAR. W rozdziałach 7 i 8 przedstawiono określanie zasięgu deformacji na terenach górniczych oraz ich czasu zanikania na terenach pogórnicznych z wykorzystaniem interferometrii satelitarnej. Rozdział 9 zawiera sformułowane wnioski końcowe.

## 2. Charakterystyka problemu badawczego

### 2.1. Problem wykrywania dużych deformacji

Satelitarna interferometria radarowa jest teledetekcyjną metodą pomiarową wykorzystującą wysokorozdzielcze zobrazenia satelitarne. Satelita wyposażony jest w zestaw radarowy, który wysyła i odbiera wiązkę fali elektromagnetycznej. Pomiarowi podlega czas przebiegu wiązki na drodze radar – powierzchnia terenu – radar oraz intensywność sygnału, na podstawie których możliwe jest określenie właściwości fizycznych powierzchni oraz odległości między powierzchnią terenu, a satelitą (Skolnik i in. 1990, Hanssen 2001). Rozdzielczość przestrzenna zobrazenia jest wprost proporcjonalna do pola powierzchni anteny emitującej sygnał, zatem aby uzyskać wysokorozdzielcze zobrazenie należy zastosować antenę o bardzo dużych rozmiarach. Rozwiązaniem tego problemu jest próbkowanie tego samego fragmentu powierzchni z różnych punktów i pod różnymi kątami podczas jednego przejścia satelity. Umożliwia to sztuczne (syntetyczne) zwiększenie anteny emitującej sygnały i uzyskanie zobrazenia o rozdzielczości dochodzącej do kilkunastu metrów (Curlander, McDonough 1991). Działające w ten sposób radary nazywane są radarami z syntetyczną aparaturą (ang. *Synthetic Aperture Radar, SAR*). Pomiarów wykonywanych metodą InSAR są pomiarami względnymi, a więc rezultatem są zobrazenia typu SAR zawierające informację o fazie i amplitudzie sygnału ostatniego cyklu, a nie o długości bezwzględnej fali. Sygnał modulowany jest w zakresie  $2\pi$ . Wynikiem pomiaru i obliczeń jest interferogram zawierający informację o przesunięciu fazowym między dwoma zobrazeniami radarowymi, na którym ruchy powierzchni terenu wizualizowane są w postaci tzw. prążków interferometrycznych. Maksymalny możliwy do zaobserwowania gradient deformacji został określony w 1998 r. jako jeden prążek interferometryczny na piksel lub bezwymiarowy stosunek rozmiaru piksela do długości fali (Massonnet i Fiegl 1998). Podejście to zostało w 2005 r. rozszerzone o minimalny wykrywalny gradient deformacji oraz uwzględnienie koherencji (Baran i in. 2005). Sygnał przebywa drogę tam i z powrotem, zatem równanie określające maksymalny wykrywalny gradient deformacji ma postać (2.1):

$$d_{\max} = \frac{\lambda}{2l} \quad (2.1)$$

gdzie:

$d_{\max}$  – maksymalny wykrywalny gradient deformacji metodami InSAR,

$\lambda$  – długość fali elektromagnetycznej,

$l$  – rozmiar piksela.

W przypadku próby wykrywania ruchów powierzchni większych od połowy długości fali zachodzi zjawisko niejednoznaczności fazy. Dany prążek interferometryczny powinien zawierać informację o przesunięciu fazowym większym od wartości połowy długości fali, nie mniej jednak z uwagi na cykliczne modulowanie sygnału, zawiera informację o przesunięciu fazowym ostatniego cyklu. Zjawisko to powielane na kolejnych prążkach w danej niecce obniżeniowej powoduje niedoszacowanie rezultatów końcowych (Bamler, Hartl 1998). Ponadto, dochodzi zjawisko aliasingu fazy (ang. *phase aliasing*), czyli nakładanie się składowych częstotliwości, wynikających ze zbyt małej częstotliwości próbkowania. W praktyce oznacza to, że w przypadku dużych deformacji interferogram powinien zawierać 10 prążków interferometrycznych, a zawiera na przykład 5. Powoduje to wykazanie mniejszego obniżenia niż jest w rzeczywistości.

W polskim górnictwie podziemnym do opisu deformacji stosuje się podział deformacji na kategorię terenu górniczego, które określane są na podstawie maksymalnych wskaźników deformacji, a konkretnie odkształceń poziomych oraz nachyleń powstałych na skutek podziemnej eksploatacji górniczej (tab. 2.1). (Kwiatek i in. 2000).

**Tab. 2.1.** Kategorie terenu górniczego w polskich warunkach górniczych (Kwiatek i in. 2000).

Kategorie	Wartości deformacji		
	Nachylenie, $T$ [mm/m]	Promień krzywizny, $R$ [km]	Odkształcenie poziome, $\varepsilon$ [mm/m]
0	$T \leq 0,5$	$ R  \geq 40$	$ \varepsilon  \leq 0,3$
I	$0,5 < T \leq 2,5$	$40 >  R  \geq 20$	$0,3 <  \varepsilon  \leq 1,5$
II	$2,5 < T \leq 5$	$20 >  R  \geq 12$	$1,5 <  \varepsilon  \leq 3$
III	$5 < T \leq 10$	$12 >  R  \geq 6$	$3 <  \varepsilon  \leq 6$
IV	$10 < T \leq 15$	$6 >  R  \geq 4$	$6 <  \varepsilon  \leq 9$
V	$15 < T$	$ R  < 4$	$ \varepsilon  > 9$

Autor poprzez duże deformacje rozumie wartości wskaźników deformacji, klasyfikowane od I kategorii wzwyż, ujawnione w ciągu 12 miesięcy, które zastąpiono maksymalnym obniżeniem wynikającym z podstawowych zależności na maksymalne nachylenia (2.2) i odkształcenia poziome (2.3) określane w teorii Knothe – Budryka (Knothe 1984):

$$T_{\max} = \frac{w_{\max}}{r} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_{\max} = \pm 0,6 \times T_{\max} \quad (2.3)$$

gdzie:

$T_{\max}$  – maksymalne nachylenie wywołane eksploatacją górniczą:

$$2,5 < T_{\max} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{m}} \right]$$

$w_{\max}$  – maksymalne obniżenie wywołane eksploatacją górnictw,

$\varepsilon_{\max}$  – maksymalne odkształcenie poziome wywołane eksploatacją górnictw:

$$1,5 < \varepsilon_{\max} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{m}} \right]$$

$r$  – parametr rozproszenia wpływów w teorii Knothego – Budryka;

$$r = \frac{H}{\text{tg}\beta} \quad (2.4)$$

$H$  – średnia głębokość eksploatacji;  $H = 800$  m dla GZW,

$\text{tg}\beta$  – parametr górotworu;  $\text{tg}\beta = 2,0$  dla GZW.

Uwzględniając powyższe otrzymano graniczną wartość obniżeń, która określa duże deformacje:

$$w_{\max} = T_{\max} \cdot r = 2,5 \cdot 400 \quad (2.5)$$

$$w_{\max} = \frac{\varepsilon_{\max}}{\pm 0,6} \cdot r = \frac{1,5}{0,6} \cdot 400 \quad (2.6)$$

$$w_{\max} = \mathbf{1000} \text{ [mm]} \quad (2.7)$$

Podobne założenie zostało przedstawione przez Niemca (2020).

Na przestrzeni lat podejmowane były próby rozwiązania problemu wykrywania dużych deformacji przez InSAR. Można stosować sensory o różnej długości fali, na przykład działające w paśmie L gdzie długość fali wynosi 24 cm. Wempen i McCarter (2017) przedstawili porównanie wykrywania deformacji metodą DInSAR (ang. *Differential InSAR*) w paśmie L oraz paśmie X. Obniżenie maksymalne wyznaczone w paśmie L wyniosło około 1,5 m w ciągu 0,5 roku. Powyższe warunki, dotyczące dużych deformacji, w tym przypadku zostały spełnione nie mniej jednak maksymalne zarejestrowane obniżenie wyniosło 2 m, co oznacza błąd rzędu około 0,5 m. Korelacje pomiędzy pomiarami InSAR z pomiarami GPS, a także modelem prognostycznym wykazano w (Ng i in. 2010). Nie mniej jednak skumulowane obniżenia InSAR wyniosły 700 mm na przestrzeni 16 miesięcy. W badaniach nad dużymi deformacjami próbowano również integracji metody DInSAR z SBAS (ang. *Small Baseline*) (Pawluszek-Filipiak, Borkowski 2020) oraz DInSAR z SqueeSAR, algorytmu pochodnego metody permanentnych rozpraszaczy PSInSAR (ang. *Permanent Scatterers InSAR*) (Przyłucka i in. 2015). W pierwszym przypadku maksymalne obniżenie wyniosło około 90 cm w okresie 22 miesięcy, zatem nie zanotowano II kategorii terenu górnictw. W drugim przypadku wykazano, że maksymalne obniżenie możliwe do wykrycia metodą SqueeSAR wynosi 33 cm/rok. Proponowano również integrację InSAR z modelami prognostycznymi (Yang i in.

2017; Jiang i in. 2021; Shi i in. 2021). Należy jednak pamiętać, że wszelkie modele prognostyczne obarczone są niepewnością, a wyniki w dużej mierze zależą od przyjętych wcześniej parametrów.

W ostatnich latach podejmowane są badania nad stosowaniem metody śledzenia pikseli OTM/OTP (ang. *Offset Tracking Method/Pixel*) do wykrywania dużych deformacji górniczych. Huang wraz z współautorami (2016) przeanalizował fragment ściany eksploatacyjnej w okresie 13.12.2012 – 22.03.2013 w mieście Yulin City w Chinach. Wyznaczono nieckę obniżeniową, w której zanotowano obniżenie maksymalne równe ok. 3,5 m. Dokonano również walidacji otrzymanych wyników na dwóch liniach pomiarowych gdzie wykonywano pomiary GPS. Błąd średniokwadratowy RMSE (ang. *Root-Mean-Square Error*) wyniósł dla jednej linii 14 cm, a dla drugiej 11 cm. Nie mniej jednak zastosowano zobrazowania pochodzące z satelity TerraSAR-X o rozdzielczości wynoszącej 3x3 m. Ten sam obszar górniczy, tylko w dłuższym okresie, analizowano w pracy (Fan i in. 2015). W celu zwiększenia dokładności dokonano integracji metody OTM z DInSAR. Ponownie natomiast wykorzystano zobrazowania TerraSAR-X. Podobny zabieg integracji OTM zastosowano w przypadkach analizowanych w pracach (Ou i in. 2018; Chen i in. 2020). Obniżenie maksymalne w nieckach wyniosło odpowiednio 2,5 m i 2,9 m. Walidację z pomiarami GPS pokazano dla obszarów gdzie obniżenia osiągnęły w pierwszym przypadku 0,85 m, a w drugim 0,90 m. Nie można zatem dokładnie stwierdzić poprawności otrzymanych maksymalnych obniżeń. Ponadto ponownie zastosowano zobrazowania z satelity TerraSAR-X. Chen i in. (2020) podjęli próbę wykorzystania zobrazowań z satelity Sentinel-1, we wnioskach natomiast wskazali, że eksperyment nie zakończył się sukcesem. Zwiększenie dokładności metody OTM możliwe jest również poprzez odpowiedni dobór rozmiaru okien korelacji krzyżowej, co wykazano w pracach (Zhao i in. 2021; Liu i in. 2022). Badania po raz kolejny były prowadzone na zobrazowaniach TerraSAR-X.

Podsumowując należy stwierdzić, że problem wykrywania dużych deformacji z wykorzystaniem metod InSAR jest cały czas aktualny, pomimo szerokiego spektrum badań prowadzonych w tym temacie. **Autor, pomimo obszernego studium literatury, nie znalazł przykładów, które rozważały ten problem kompleksowo, na więcej niż jednym poligonie badawczym, a rezultaty potwierdzone zostały dokładną walidacją opartą o pomiary wykonywane klasycznymi metodami geodezyjnymi.** W literaturze przedmiotu brakuje pozycji, które jasno określałyby możliwości InSAR w wykrywaniu obniżeń większych od 1000 mm ujawnionych w ciągu 12 miesięcy, szczególnie z wykorzystaniem zobrazowań satelitarnych pochodzących z konstelacji Sentinel-1.

## 2.2. Problem czasu zanikania i zasięgu deformacji górniczych.

Badania nad zasięgiem deformacji w GZW mają swoją genezę w 1956 r. (Budryk, Knothe 1956). Zasięg deformacji zdefiniowano jako równy głębokości eksploatowanego pokładu. Nie mniej jednak eksploatacja była w tamtych czasach prowadzona w zupełnie innych warunkach górniczo-geologicznych niż współcześnie. Węgiel kamienny wydobywano krótkimi ścianami (ubierki) lub zabierkami na głębokości około 250 m, w znaczny zakresie (prawie połowa) z podsadzką. Obecnie średnia głębokość eksploatacji wynosi około 800 m. Wybierane są ściany w długości 200-250 m i wybiegu około 1000 m, wyłącznie z zawałem skał stropowych (Kowalski 2020). W ujęciu teoretycznym wpływy eksploatacji występują w nieskończoność co wynika bezpośrednio z przyjętej funkcji wpływów Gaussa, jednak w praktyce zachodzi potrzeba ograniczenia zasięgu, co jest utrudnione z uwagi na błędy pomiarowe. Kowalczyk (1972), po analizie błędów pomiarów, określił kryterium zasięgu jako obniżenia wynoszące 5 mm/m.

Badania nad zanikaniem deformacji na terenach pogórnicych również mają swoją genezę w 1956 r. (Budryk, Knothe 1956) i dotyczą innych niż obecnie warunków górniczo-geologicznych. Zgodnie z przyjętymi założeniami uspokojony górotwór to taki w którym prędkość narastania obniżeń nie przekroczyła 3 mm/miesiąc w 3 kolejnych cyklach pomiarowych lub po 10 latach od zakończenia eksploatacji. Nowsze badania, oparte o doświadczenia z Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego (DZW) wskazują, że czas zanikania deformacji wynosi 5 lat (Kowalski i in. 2000). W ujęciu teoretycznym do określania czasu  $t$  zanikania deformacji wykorzystuje się funkcję czasu Knothe'go (1984):

$$T(t) = 1 - e^{-ct} \quad (2.8)$$

gdzie:

$c$  – parametr zwany współczynnikiem czasu.

Współczynnik czasu  $c$  wyznaczany jest z pomiarów geodezyjnych.

Ponadto parametr  $c$  zależny jest od głębokości eksploatacji, budowy geologicznej górotworu oraz jego naruszenia wcześniejszą eksploatacją. Wszystkie powyższe czynniki mają bezpośredni wpływ na dokładność określania czasu zanikania deformacji według teorii Knothe'go.

Z przedstawionego problemu wynika, że zasięg deformacji oraz czas ich zanikania zostały wyznaczone i przyjęte na podstawie klasycznych pomiarów geodezyjnych oraz, co jest szczególnie ważne, dla warunków górniczo-geologicznych sprzed siedemdziesięciu lat. Ponadto, klasyczne pomiary geodezyjne są ograniczone powierzchniowo, co sprawia, że na

dużych obszarach, wpływy eksploatacji muszą być ekstrapolowane. Współczesne sensory radarowe i metody InSAR mogą dostarczyć danych, które pozwolą rozwiązać problem zasięgu i czasu zaniku deformacji.

### 3. Stan wiedzy dotyczący problemu badawczego

#### 3.1. Deformacje górnicze

##### 3.1.1. Geneza deformacji i ich opis

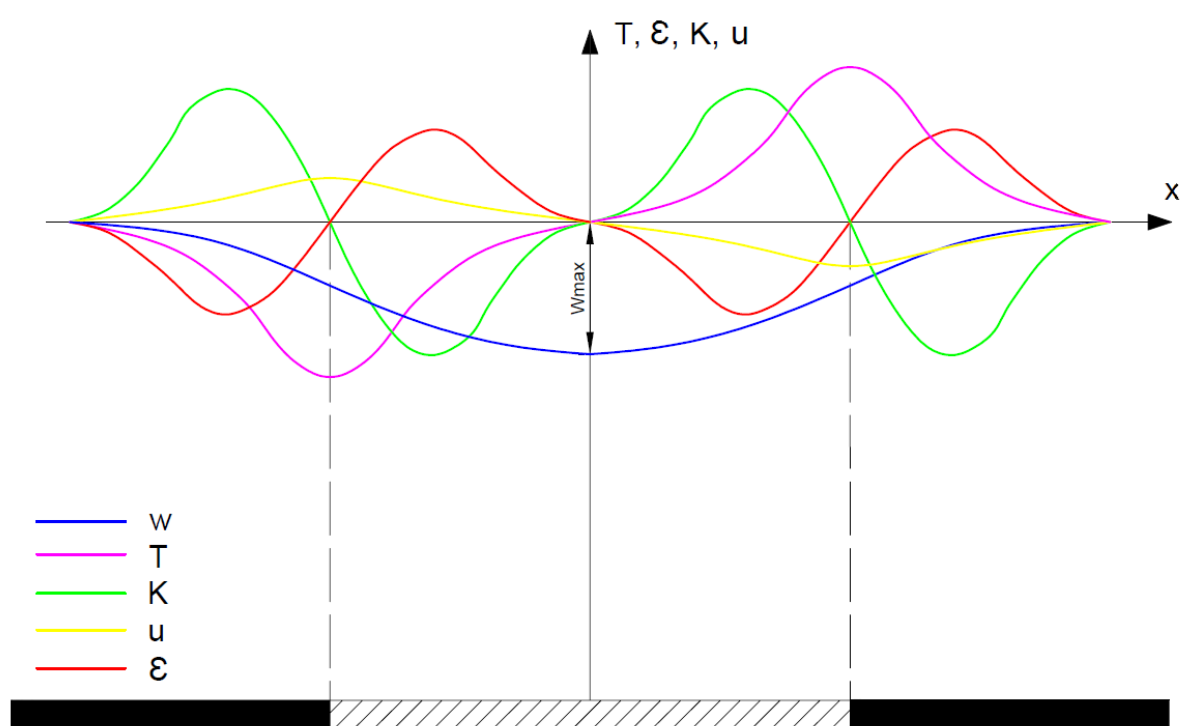
Każda podziemna eksploatacja powoduje powstawanie pustek w górotworze. Na skutek działania grawitacji następuje przemieszczenie się mas skalnych do wybranych pustek czego efektem jest ujawnianie się deformacji na powierzchni. Można je podzielić na wpływy bezpośrednie, pośrednie oraz wtórne. Bezpośrednie związane są ze zniekształceniami górotworu oraz powierzchni po przemieszczeniu się mas skalnych. Deformacje pośrednie to zjawiska towarzyszące jak np. zmiana warunków hydrologicznych górotworu, a wtórne są wynikiem aktywacji starych nieujawnionych wpływów. Ze względu na formę, deformacje możemy podzielić na ciągłe (które są przedmiotem badań niniejszej pracy) lub nieciągłe (Kwiatek i in. 1997).

Deformacje ciągłe opisywane są na drodze teoretycznej *a priori* podczas prognozowania, a także *a posteriori*, najczęściej na podstawie pomiarów geodezyjnych, a także obecnie przy wykorzystaniu technologii LIDAR (ang. *Light Detection and Ranging*) i InSAR. Ujawniają się w postaci niecki obniżeniowej, to jest przemieszczeń pionowych (obniżeń,  $w$ ) oraz towarzyszącymi jej wskaźnikami deformacji do których należą (Kwiatek i in. 1997):

- przemieszczenia poziome –  $u$ ,
- nachylenia –  $T$ ,
- krzywizny pionowe –  $K$ ,
- odkształcenia poziome –  $\varepsilon$ .

Schemat rozkładu wskaźników deformacji spowodowanej eksploatacją nieskończonego pasa pokładu o szerokości  $2r$ , gdzie  $r$  jest parametrem teorii Knothe'go – Budryka definiowanym jako parametr rozproszenia wpływów na powierzchni, przedstawiono na rysunku 3.1.





**Rys. 3.1.** Rozkład wskaźników deformacji powierzchni spowodowanej eksploatacją nieskończonego pasa pokładu;  $w$  – obniżenia,  $T$  – nachylenia,  $K$  – krzywizny pionowe,  $u$  – przemieszczenia poziome,  $\varepsilon$  – odkształcenia poziome (opracowanie własne na podstawie Knothe 1984).

Jako skutek eksploatacji górniczej obserwowane są również wypiętrzenia powierzchni, które mogą mieć związek z sejsmicznością. Zjawisko wypiętrzenia powierzchni, w warunkach GZW, zostało opisane na podstawie badań przemieszczeń pionowych przez Sokołę-Szewiołę (2011). W ostatnich latach zostało potwierdzone z wykorzystaniem technologii satelitarnych InSAR (Sopata i in. 2020; Kura 2020) oraz GNSS (Ćwiękała 2022). Ćwiękała zaobserwował występowanie wypiętrzenia terenu przed silniejszymi wstrząsami sejsmicznymi w ich strefie epicentralnej, a potem powolny powrót do sytuacji przed wystąpieniem wstrząsu. Pomiary wykazały przemieszczenia pionowe w przedziale od +120 mm do -70 mm oraz incydentalne od +350 mm do -200 mm. Zjawisko wypiętrzenia i obniżania się powierzchni terenu ma szczególne znaczenie dla sejsmologów, przez analogię do trzęsień Ziemi, jako prekursor wstrząsów górniczych (Marczak, Zuberek 1994). Zauważono, że przyrost deformacji (odkształceń) jest miarą rozwoju spękań w skale – wzrostu objętości w procesie dylatacji.

Deformacje nieciągłe mogą przybierać formę zapadlisk, stopni i szczelin oraz struktur z nich złożonych (Ryncarz 1992). Badania statystyczne przeprowadzone przez Chudka i zespół (1976, 1980) wykazały, że przyczyną 80% deformacji nieciągłych występujących w GZW była płytka eksploatacja prowadzona z zawałem skał stropowych. Z badań wykonanych w Głównym Instytucie Górnictwa (GIG) w 2007 r. wynika, że ujawnianie się deformacji nieciągłych na

powierzchni jest związane z koncentracją krawędzi eksploatacyjnych, a w zawiązku z tym, występowaniem odkształceń poziomych rozciągających. Efektem badań są również dwie metody prognozowania deformacji nieciągłych oparte na odkształceniach poziomych (Kowalski i in. 2010, Kowalski 2020).

### 3.1.2. Prognozowanie deformacji

Badania deformacji powierzchni w GZW rozpoczęły się od pomiarów geodezyjnych. Na ich podstawie powstało kilka metod prognozowania deformacji, a ich obecny podział podaje Kowalski (2020):

- a) metody analityczne (empiryczne, geometryczno-całkowe),
- b) metody oparte na mechanice ośrodków ciągłych,
- c) metody stochastyczne,
- d) metody numeryczne.

Metody oparte na mechanice ośrodków ciągłych (mechanice górotworu) dobrze sprawdzają się do opisu deformacji w niewielkim otoczeniu wyrobiska górniczego. Badania nad tymi zagadnieniami prowadził między innymi Drzęźła (1978, 1989), który traktował górotwór jako ośrodek sprężysty.

Prekursorem metod stochastycznych był Litwiniszyn. Opracował ogólną teorię ośrodka stochastycznego (1953, 1956). Górotwór traktował jako ośrodek sypki (makrogruzowisko). Obecnie w Polsce teorię Litwiniszyna stosują i rozwijają między innymi Niemiec (2008) oraz Białek i Sikora (2012, 2019).

Do metod numerycznych zalicza się (Kowalski 2020):

- metodę elementów skończonych – MES (ang. finite element method, FEM),
- metodę elementów brzegowych – MEB (ang. boundary element method, BEM),
- metodę elementów odrębnych – MEO (ang. discrete element method, DEM),
- metodę różnic skończonych – MRS (ang. finite difference method, FDM).

Podstawy teoretyczne metody MES były przedstawione już w latach 70-tych (Zienkiewicz 1972). Za prekursorów modelowania numerycznego górotworu można uznać Filcka, Tajdusia i Walaszczyka (Walaszczyk 1980; Tajduś 1983; Filcek i in. 1994). W 1988 r. Szostak-Chrzanowska w swojej pracy doktorskiej przedstawiła porównanie obniżeń obliczonych metodą MES z wynikami pomiarów geodezyjnych (1988). Górotwór traktowała jako ośrodek nieliniowo sprężysty. Model ten był wyjściem do kolejnych badań, których rezultatem są liczne publikacje opisujące stan górotworu pod wpływem eksploatacji górniczej (Szostak-Chrzanowska i in. 1997, 2011; Chrzanowski i in. 1998). Analizy dotyczące stosowania modeli

numerycznych w prognozowaniu deformacji górniczych prowadzono na obszarach Legnicko-Głogowskiego Okręgu Przemysłowego (LGOM) (Walaszczyk, Wiewiórka 2004, 2007; Milczarek 2011). Największa liczba badań dotyczyła natomiast GZW (Kwaśniewski, Wang 1994; Wesołowski 2001, 2016; Białek i in. 2001; Tajduś 2007, 2013; Kowalski i in. 2019). Obecnie w Polsce prognozowanie deformacji z wykorzystaniem metod numerycznych stosowane jest na obszarach LGOM.

Początkiem metod analitycznych było opracowanie przez Balsa i Keinhorsta funkcji wpływu (1932; 1934). W Polsce najbardziej znanymi teoriami analitycznymi są teoria Kochmańskiego (1956) oraz Knothego – Budryka (Budryk 1953; Knothe 1953a, 1984, 1993), przy czym najbardziej rozpowszechniona jest teoria Knothego – Budryka, która oparta jest o następujące założenia:

1. Funkcja opisująca obniżenia, jest funkcją rozkładu normalnego Gaussa.
2. Zgodnie z hipotezą Awierszyna (Budryk 1953), przemieszczenia poziome są proporcjonalne do nachyleń.
3. Ośrodek (górotwór) jest nieściśliwy.

Wzory teorii Knothego – Budryka do opisu prognozowania deformacji znajdują się w wielu monografiach (Knothe 1984; Kwiatek i in. 1997; Białek 2003; Popiołek 2009; Kowalski 2015, 2020). Duże znaczenie miało opracowanie programów komputerowych do prognozowania deformacji, w których do kalibracji modeli wykorzystuje się wyniki pomiarów geodezyjnych wskaźników deformacji. Są to głównie programy: EDBJ-OPN (Białek 2003), SZKODY 5.0 (Jędrzejec 2008), Modez (Hejmanowski, Kwinta 2009), DEFK-Win (Ścigała 2008) oraz Explon (Niemiec 2020). W GIG prowadzone są badania nad wyznaczaniem parametrów teorii Knothego – Budryka. Porównywane są wskaźniki deformacji przyjmowane *a priori* do prognoz z pomierzonymi *a posteriori*, czego efektem jest wyznaczenie odchyłek i różnic wskaźników (Kowalski 2020). Parametry teorii wyznacza się wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów, przez porównywanie obniżeń teoretycznych do pomierzonych na pomocą autorskiego oprogramowania komputerowego (Jędrzejec 2002).

Współcześnie do prognoz deformacji w Polsce stosuje się metody geometryczno-całkowego, a w górnictwie światowym metody numeryczne oraz modyfikowane metody empiryczne i geometryczno-całkowe.

### 3.1.3. Zasięg deformacji górniczych

Zasięg wpływów eksploatacji  $L$  jest to najkrótsza pozioma odległość pomiędzy rzutem krawędzi eksploatacyjnej na głębokość  $H$ , a punktem leżącym na powierzchni, w którym

wpływy eksploatacji praktycznie zanikają (Janusz 1970). Dla pokładów nachylonych należy uwzględnić zależność wynikającą z przesunięcia wpływów w stronę upadu pokładu (3.1).

$$\Delta L = H \times \text{ctg}(\alpha) \quad (3.1)$$

gdzie:

$\alpha$  – kąt nachylenia pokładu.

Wiadomo jest, że zasięg deformacji zależy od głębokości eksploatacji, budowy geologicznej nadległego górotworu i jego zdeformowania wcześniejszą eksploatacją górniczą. Z analizy teoretycznej wskaźników deformacji wynika, że brak wpływów, albo wpływy zerowe występują w nieskończoności, wynika to z przyjętej funkcji wpływów Gaussa w teorii Knothego – Budryka. W rzeczywistości deformacje górnicze ujawniają się w pewnej odległości od krawędzi eksploatacji, co ma istotne znaczenie z uwagi na odpowiedzialność zakładu górniczego za szkody powstałe w wyniku jego działalności (Ostrowski 2015).

Janusz (1970) wskazują na potrzebę ograniczania zasięgu wpływów w dostosowaniu do wyniki pomiarów geodezyjnych wskaźników deformacji. W praktyce określenie granicy zasięgu deformacji jest utrudnione z uwagi na błędy pomiaru deformacji, głównie obniżeń, wskaźnika którego pomiarowe wyznaczanie odbywa się na drodze niwelacji geometrycznej i/lub precyzyjnej. Błąd średni wyznaczonej wysokości (rzędnej punktu określa zależność (3.2):

$$m_{hi} = \sqrt{m_1^2 L_{0i} + m_2^2 L_i} \quad (3.2)$$

gdzie:

$m_1$  – średni błąd kilometrowy w ciągu dowiązanym,

$L_{0i}$  – długość ciągu [km],

$m_2$  – średni błąd kilometrowy w sieci obserwacyjnej,

$L_i$  – długość ciągu obserwacyjnego dla określenia rzędnej i-tego punktu [km].

Na podstawie wieloletnich obserwacji prowadzonych na terenach górniczych można przyjąć, że średni błąd kilometrowy niwelacji geometrycznej wynosi (3.3) (Kowalczyk 1972):

$$m_1 \cong m_2 = m = \pm 1 \text{ [mm]} \quad (3.3)$$

Kowalczyk (1972) po dyskusji i analizie błędów pomiarów obniżeń na terenach górniczych wyznaczył, jako kryterium zasięgu wpływów, obniżenia wynoszące 5 mm/m. Natomiast Janusz (1970) przyjmuje jeszcze drugie kryterium - odkształcenie poziome wynoszące +0,1 mm/m. Według Górala i współautorów (2005) maksymalne wartości błędów wyznaczenia wysokości

punktów dla sieci „Gigant” w GZW nie przekraczają  $\pm 5$  mm. Dokładność ta jest wystarczająca dla wyznaczania zasięgu wpływów, przy czym dokładniejsza interpolacja zasięgu wymaga uwzględnienia pomiarów prowadzonych na liniach obserwacyjnych poszczególnych kopalń. Jako kryterium zasięgu wpływów proponują przyjmować wartość obniżeń wynoszącą 10 mm.

Należy jednak zaznaczyć, że założenie stałości punktów dowiązania nie można traktować rygorystycznie ze względu na wartość błędu wyznaczenia wysokości punktu na który mają wpływ naturalne ruchy skorupy ziemskiej, na przykład ruchy pływowe Ziemi (Melchior 1983), a także procesy związane z działalnością techniczną człowieka. Rozgraniczenie poszczególnych rodzajów wpływów nie jest możliwe. Ruchy pływowe Ziemi w kierunku pionowym (podnoszenie i opadanie) wynikają ze zróżnicowanych oddziaływań słońca, planet układu słonecznego i księżyca na planetę ziemską. Ma to związek z jej rozmiarami (średnicą). Punkty leżące na przeciwległych krańcach Ziemi mają zróżnicowane oddziaływania grawitacyjne. Te leżące bliżej księżyca mają większe oddziaływania (są przyciągane mocniej przez księżyc) od tych leżących po przeciwnej stronie Ziemi. Siły te „rozciągają” planetę ziemską. Jeśli pływ jest większy to powierzchnia Ziemi podnosi się i odwrotnie jeśli pływ jest mniejszy to obniża się. Największa wartość oddziaływań pionowych w okresie połowy doby wynosi 385 mm na długości odpowiadającej średnicy kuli ziemskiej (ściskanie i rozciąganie), natomiast w okresie roku tylko 3 mm. Zmiany horyzontalne są mniejsze wynoszą odpowiednio od 54 mm do 0,4 mm.

Pierwsze zdefiniowanie zasięgu wpływów miało miejsce w 1956 r. Budryk i Knothe (1956) zaproponowali, że zasięg wpływów jest równy głębokości zalegania najgłębszego pokładu (3.4).

$$L = H \quad (3.4)$$

Definicja oparta była na bazie pomiarów deformacji powierzchni, spowodowanych eksploatacją górnictwem głównie z podszadką hydrauliczną i prowadzonej na średniej głębokości równej 200-250 m. Obecnie średnia głębokość wynosi około 800 m, a eksploatację prowadzi się system ścianowym z zawałem skał stropowych, co powoduje dużo większe deformacje na powierzchni. Dodatkowo, górotwór jest dużo bardziej doświadczony wieloletnią eksploatacją w stosunku do lat 50-tych.

W teorii Knothe - Budryka zasięg deformacji górniczych określany jest za pomocą parametru rozproszenia wpływów  $r$  jako (3.5):

$$L = 1,5r \quad (3.5)$$

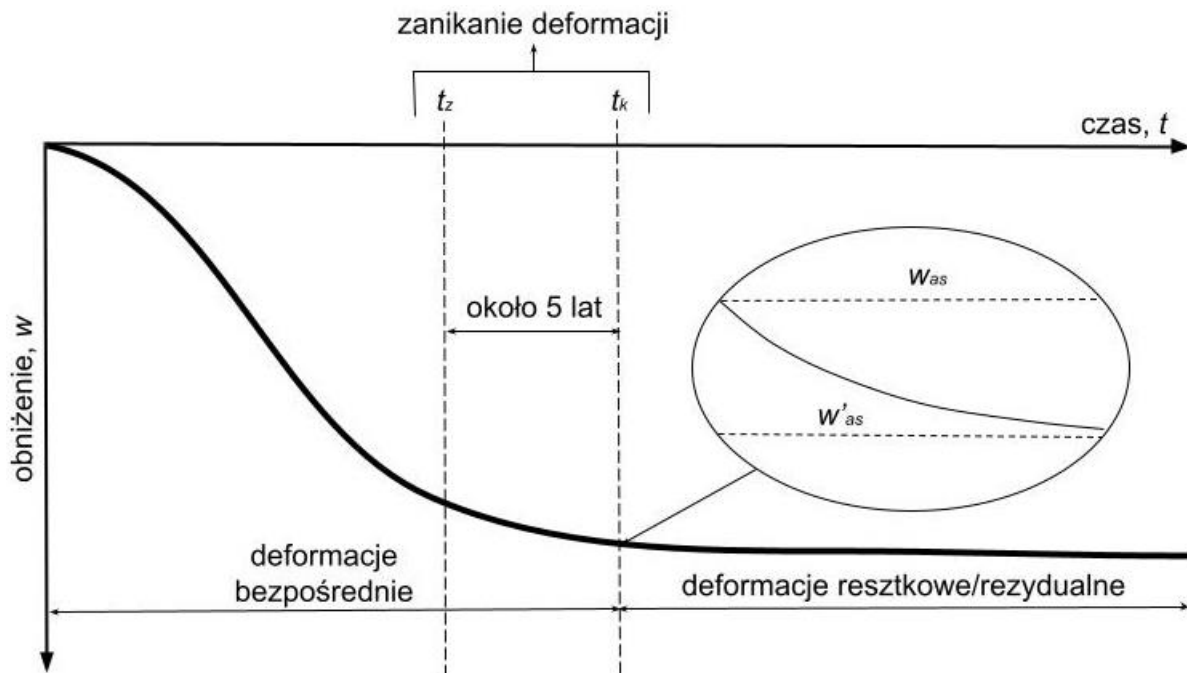
gdzie:

$r$  – parametr rozproszenia wpływów.

Kolejne badania Białka (Białek 1991, 1993, 2003) wykazały, że deformacje mogą występować w odległości większej niż głębokość eksploatowanego pokład. Sposób opisu tych wpływów polega na liniowej superpozycji funkcji wpływów Gaussa. Ponadto, rozwiązania pozwalające prognozować dalekie deformacji opracował Dżegniuk (1975), Greń (1981) i Zych (1987).

#### 3.1.4. Zanikanie deformacji po zakończeniu eksploatacji

Badania nad zanikaniem deformacji w GZW, podobnie jak w przypadku zasięgu, mają swoją genezę w 1956 r (Budryk, Knothe 1956). Za tereny uspokojone uznano obszary gdzie prędkość narastania obniżen stwierdzona w 3 kolejnych miesiącach nie przekracza 3 mm/miesiąc lub jeżeli od zakończenia eksploatacji upłynęło 10 lat (w przypadku braku danych niwelacyjnych). Tyrała (1995) wskazał, że proces zaciskania się pustek poeksploatacyjnych jest procesem długotrwałym i wiekowym i może występować po upływie 10 lat, czego efektem mogą być ujawniające się na powierzchni deformacje resztkowe zwane też rezydualnymi. W monografii opisującej doświadczenia z wałbrzyskich kopalń węgla kamiennego zdefiniowano deformacje resztkowe jako te występujące po upływie 5 lat od zakończenia eksploatacji (rys. 2.3).



**Rys. 3.2.** Rozkład deformacji powierzchni w długim okresie czasu (opracowanie własne na podstawie Kowalski i in. 2000).

Przez lata rejon DZW był poligonem doświadczalnym dotyczącym deformacji występujących po zakończeniu eksploatacji górniczej z uwagi na fakt likwidacji kopalń w latach 90-tych. Badania prowadzono w latach 2000 – 2008 na istniejącej osnowie pomiarowej oraz po jej rozbudowaniu po 2009 r. (Blachowski, Milczarek 2016). Później badania rozszerzono o monitoring z wykorzystaniem metody interferometrii satelitarnej (Milczarek i in. 2017). Zaobserwowano także zjawisko wypiętrzania się górotworu, które związane jest z odbudową zwierciadła wód w karbonie na terenach pogórnich (Fenk 1999; Milczarek 2011). Syntetyczny opis problemu zanikania deformacji resztkowych w rejonach DZW, ale również GZW dokonano w publikacji (Kowalski 2017). Artykuł jest odpowiedzią na publikację wydaną na łamach *Mining Science and Technology* (Vervoort, Decelercq 2017), w której przedstawiono raport z obniżen na terenach pogórnich w rejonie kopalni Houthalen w Belgii, otrzymanych z analizy interferogramów. Monitoring deformacji na terenach pogórnich prowadzi się również w GZW, choć należy zaznaczyć, iż są to jednostkowe przypadki, a nie określona w prawie praktyka profilaktyczna. Przykładem takich działań mogą być pomiary niwelacyjne Sieci Gigant obejmującej prawie wszystkie kopalnie. Jest to sieć założona w 1968 roku przez Przedsiębiorstwo Miernictwa Górniczego (PMG) (Kowalski 2017). Znaki wysokościowe (repery) były stabilizowane w ścianach dużych budynków, kościołów i przyczółkach mostów, wzdłuż szlaków komunikacyjnych. Pomiary tej sieci były prowadzone jako niwelacja precyzyjna II klasy, w różnych interwałach czasowych, najczęściej w odstępach 2 - 3 lat. Wyniki pomiarów były udostępniane w postaci katalogów wysokości znaków pomiarowych. Średnie błędy określenia wysokości punktów sieci wynosiły od  $\pm 0,17$  mm do  $\pm 4,4$  mm, stąd błąd średni obniżenia punktu jest równy  $\pm 0,24$  mm do  $\pm 6,2$  mm. Sieć Gigant była nawiązana do znaków uznanych za stałe, leżących poza zasięgiem wpływów eksploatacji górniczej, w miastach Dąbrowa Górnicza (dzielnica Strzemieszyce), Żory i Kęty. Niestety, ostatni pomiar sieci wykonano w 2005 r. i nie są kontynuowane. Na obszarach GZW od kilkunastu lat prowadzone są również badania ruchów powierzchni metodą interferometrii satelitarnej (Graniczny i in. 2015; Przyłucka 2016).

W ujęciu teoretycznym do opisu czasu zanikania deformacji po zakończeniu eksploatacji wykorzystuje się funkcję Knothego (1984):

$$T(t) = 1 - e^{-ct} \quad (3.6)$$

Wykorzystując zależność (3.6) czas zaniku przyrostów deformacji można określić wzorem (3.7):

$$t = -\frac{1}{c} \ln \left( 1 - \frac{\Delta w}{w_{as}} \right) \quad (3.7)$$

gdzie:

$\Delta w$  - wartość zaniku przyrostów obniżeń po zakończeniu eksploatacji,

$w_{as}$  – wartość spodziewanych obniżeń asymptotycznych po zakończeniu eksploatacji.

Do wyznaczania czasu zaniku obniżeń według zależności (3.7) konieczna jest znajomość dla analizowanych warunków geologicznych i górniczych współczynnika czasu  $c$ , który wyznacza się najczęściej z pomierzonych obniżeń w funkcji czasu. W GIG, wartość współczynnika czasu  $c$ , określa się wykorzystując algorytm opisujący zanikanie obniżenia metodą najmniejszych kwadratów (Kowalski i in. 2000), zaimplementowany do autorskiego oprogramowania komputerowego.

Funkcja czasu Knothego stosowana jest dla opisu deformacji nieustalonych występujących zarówno w trakcie trwania eksploatacji jak również po jej zakończeniu. Kowalski (2007) zaproponował uogólnioną funkcję czasu, która zawiera dwie składowe odpowiadające wpływom natychmiastowym, spowodowanych ruchem skał, które otaczają wyrobisko oraz wpływem występującym w dłuższym okresie czasu. Hejmanowski (2013) natomiast zaproponował aby współczynnik czasu  $c$  zastąpić charakterystycznymi wartościami odpowiadającymi lokalnym właściwością skał.

## 3.2. Interferometria satelitarna

### 3.2.1. Podstawy interferometrii satelitarnej

InSAR jest ugruntowaną teledetekcyjną metodą pomiarową stosowaną od lat 90-tych ubiegłego wieku. Wykorzystuje zobrazenia radarowe pochodzące z satelitów wyposażonych w radar typu SAR czyli z syntetyczną aparaturą. W klasycznych radarach w celu zwiększenia rozróżnialności sygnału (zawężenia wiązki) i tym samym zwiększenia rozdzielczości zobrazenia, należy stosować anteny większych rozmiarów, co jest ograniczone możliwościami konstrukcyjnymi. Radar typu SAR umieszczony jest na satelicie poruszającej się po niskiej orbicie okołoziemskiej (ang. *Low Earth Orbit, LEO*), na wysokości do 1000 km. Dany fragment powierzchni ziemi jest próbkowany z różnych pozycji satelity i pod różnymi kątami. Następnie taki sygnał jest syntetyzowany, czyli składany w sztuczny sposób, co pozwala na wirtualne zwiększenie rozmiarów satelity i ominięcie problemu konstruowania bardzo dużych anten. Stosowane radary są sensorami aktywnymi pozwalającymi na pracę bez względu na porę dnia oraz warunki pogodowe (Zebker, Goldstein 1986; Ferretti 2014). Wysyłana wiązka jest falą elektromagnetyczną o długości od kilku do kilkudziesięciu



centymetrów. Każdy zarejestrowany piksel zobrazenia wykonanego przez radar z syntetyczną aparaturą zawiera informację o liczbie zespolonej składającej się z fazy oraz amplitudy sygnału (3.8) (Hanssen 2001):

$$y = |y| \exp(j\psi) \quad (3.8)$$

gdzie:

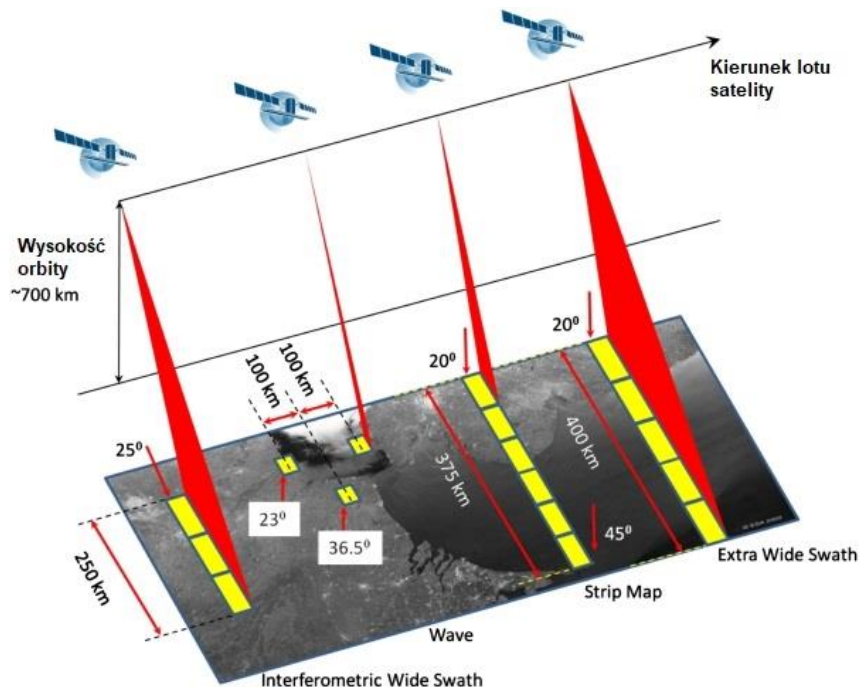
$j$  – amplituda sygnału,

$\varphi$  – faza sygnału.

Radary SAR dają możliwość akwizycji zobrażeń w różnych trybach różniących się rozdzielczością oraz zakresem pozyskiwanych zobrażeń. Do najczęściej stosowanych należą (ESA User Guides 2023):

- a) Interferometric Wide Swath (IW),
- b) Extra Wide Swath (EW),
- c) Stripmap (SM),
- d) Wave.

Podstawowe różnice w poszczególnych trybach w syntetyczny sposób pokazano na rysunku 3.3.



**Rys. 3.3.** Najczęściej stosowane tryby pozyskiwania zobrażeń SAR (ESA User Guides 2023).

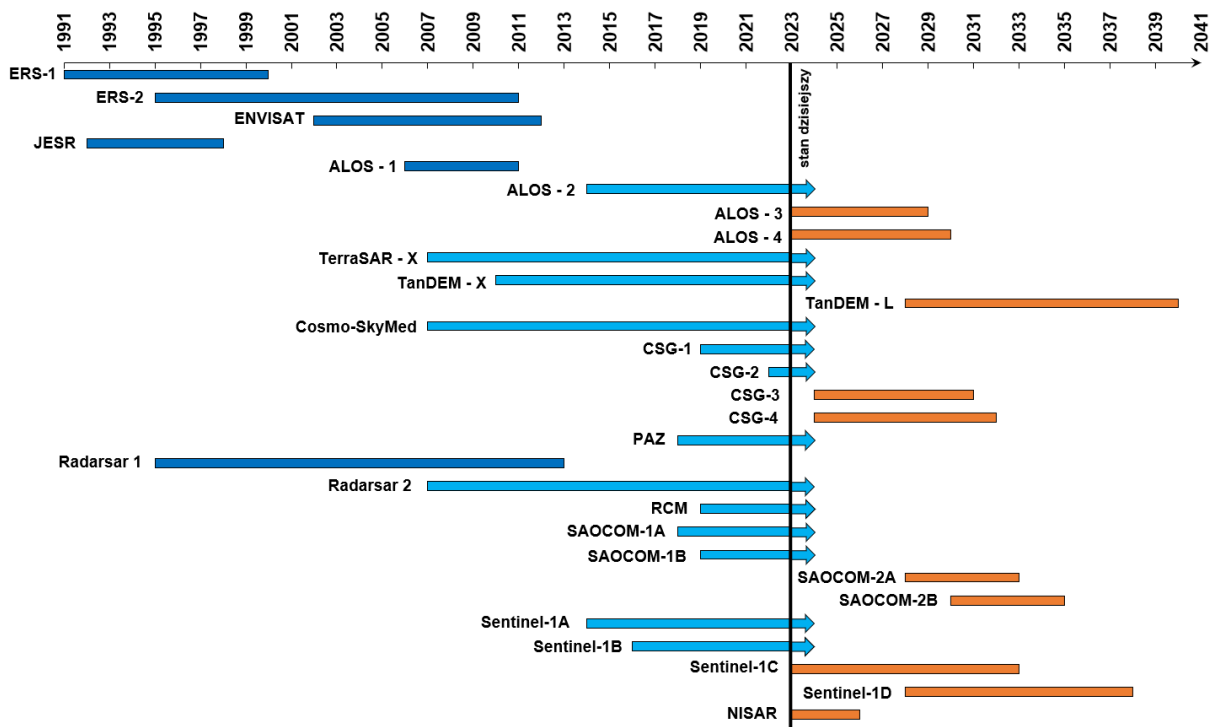
Pierwszym satelitą wyposażonym w radar SAR był amerykański satelita SEASAT, który został wystrzelony w 1978 roku. Satelita działał w paśmie mikrofalowym L, czyli długość

emitowanej fali wynosiła 23,6 cm (Gruszczyńska 1999). Pierwszymi europejskimi satelitami radarowymi była konstelacja dwóch Europejskich Satelitów Teledetekcyjnych (ang. *European Remote Sensing, ERS*). Pierwszy z nich, satelita ERS-1, rozpoczął pracę w 1991 r. Cztery lata później dołączył do niego ERS-2. Obie satelity działały w paśmie C i długość ich fal była równa 5,6 cm, a czas ich rewizyty wynosił 35 dni. Swoją pracę zakończyły odpowiednio w 2000 i 2011 roku. ESA w 2002 roku wystrzeliła jeszcze jednego satelitę będącego częścią innej misji, ENVISAT (ang. *Environmental Satellite*). Satelita również był wyposażony w radar typu SAR, a czas jego rewizyty wynosił 35 dni. Swoją pracę zakończył w 2012 roku. Rozwój InSAR na przestrzeni lat doprowadził do powstania kilku kolejnych konstelacji satelitów. W 2014 roku rozpoczął pracę japoński satelita radarowy ALOS-2 (ang. *Advanced Land Observing Satellite*). Jest on bezpośrednim następcą satelity ALOS-1 oraz JERS (ang. *Japanese Earth Resource Satellite*). Satelita działa w paśmie L, a w przyszłości planowane są kolejne misje satelitów ALOS-3 i ALOS-4. Na uwagę zasługują również dwie niemieckie satelity pracujące w tandemie – satelita TerraSAR-X oraz TanDEM-X. Okrążają Ziemię w czasie 11 dni i działają w paśmie X, zatem długość ich fali elektromagnetycznej jest równa 3,1 cm. Pracę rozpoczęły odpowiednio w 2007 i 2010 roku i jest ona do dzisiaj kontynuowana (stan na luty 2023). Istotnym elementem w przypadku satelitów TerraSAR-X i TanDEM-X jest ich rozdzielczość. Satelity pozwalają pozyskiwać zobrażenia o rozdzielczości 3x3 m. Poza trzema opisanymi konstelacjami dane radarowe pozyskują satelity działające w następujących konstelacjach (CEOS EO Handbook 2023):

- a) COSMO-SkyMed (ang. *Constellation of Small Satellites for Mediterranean Basin Observation*) – kraj: Włochy; konstelacja: 2 satelity; czas rewizyty: 16 dni; pasmo: X;
- b) CSG (ang. *COSMO-SkyMed Second Generation*) – kraj: Włochy; konstelacja: 2 satelity; czas rewizyty: 16 dni; pasmo: X;
- c) PAZ – kraj: Hiszpania; konstelacja: 1 satelita; czas rewizyty: 11 dni; pasmo: X;
- d) Radarsat – kraj: Kanada; konstelacja: 1 satelita; czas rewizyty: 24 dni; pasmo C;
- e) RCM (ang. *Radarsat Constellation Mission*) – kraj: Kanada; konstelacja: 3 satelity; czas rewizyty: 12 dni; pasmo: C;
- f) SAOCOM (hiszp. *Satélite Argentino de Observación Con Microondas*) – kraj: Argentyna; konstelacja: 2 satelity; czas rewizyty: 16 dni; pasmo: L.

Obecnie najpopularniejszymi satelitami radarowymi są satelity Sentinel-1A i 1B przy czym satelita Sentinel-1B w grudniu 2021 roku uległ awarii i nie został do dnia dzisiejszego naprawiony (stan na dzień luty 2023). Konstelacja należy do ESA i rozpoczęła pracę w 2014 r. przez wystrzelenie na orbitę satelity Sentinel-1A. Sentinel-1B dołączył na orbitę w 2016 roku.

Są one następcami satelitów radarowych ERS i ENVISAT. Wykonują zobrażenia o rozdzielczości przestrzennej 5 x 20 m z wykorzystaniem pasma C, naprzemiennie co 6 dni w przypadku działania dwóch satelitów i co 12 dni w przypadku jednego satelity. Popularność zobrażeń pochodzących z satelitów Sentinel 1A i 1B wynika z tego, że są one dostępne w ramach programu Copernicus na licencji otwartego dostępu. W przyszłości podmioty zarządzające poszczególnymi konstelacjami satelitów radarowych, takie jak ESA, planują dalszy rozwój i wysyłanie w ramach swoich programów nowych, bardziej zaawansowanych technologicznie, satelitów. Nowością ma być satelita NISAR, którego misję planują NASA wraz z Indyjską Organizacją Badań Kosmicznych (ang. *Indian Space Research Organization, ISRO*). Satelita na orbicie ma się znaleźć już w 2023 r., ma działać na częstotliwości L, a czas rewizyty ma wynieść 12 dni (CEOS EO Handbook 2023). Żywotność poszczególnych konstelacji wraz z planowanymi misjami przedstawiono na rysunku 3.4.

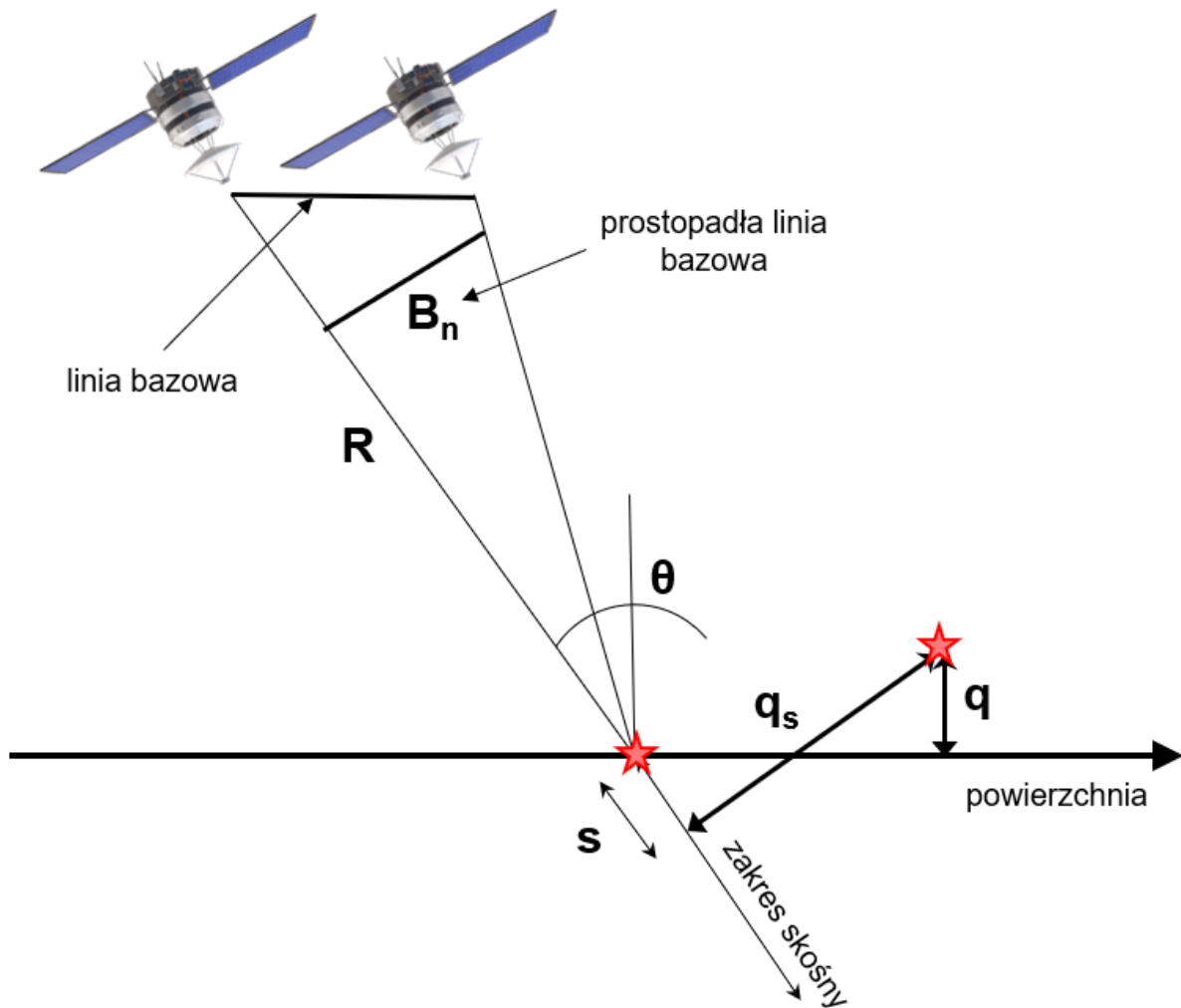


**Rys. 3.4.** Diagram przedstawiający żywotność poszczególnych konstelacji satelitów radarowych wraz z planowanymi misjami w przyszłości (opracowanie własne na podstawie CEOS EO Handbook 2023).

W związku z dalszym rozwojem kolejnych misji satelitarnych, co jest równoznaczne ze zwiększaniem możliwości metod InSAR należy spodziewać się, że technologia SAR będzie coraz częściej rywalizować z klasycznymi pomiarami wykonywanymi metodami geodezyjnymi.

Metody InSAR wykorzystują przesunięcie fazowe (różnice faz) w satelitarnych obrazach radarowych przedstawiających ten sam obszar ale wykonanych z dwóch różnych

satelitów (lub z dwóch różnych pozycji jednego satelity). Schemat geometryczny pomiaru SAR przedstawiono na rysunku 3.5.



Rys. 3.5. Schemat geometrii pomiaru SAR (opracowanie własne na podstawie Ferretti i in. 2007).

Podczas pomiaru SAR parametrami geometrycznymi są (Ferretti i in. 2007):

- $B_n$  – prostopadła linia bazowa – odległość prostopadła pomiędzy dwoma pozycjami satelitów,
- $R$  – odległość od satelity do mierzonego obiektu,
- $q$  – różnica wysokości między obiektem, a poziomą płaszczyzną odniesienia,
- $q_s$  – odległość pomiędzy obiektem na jednym i drugim zobrazeniu,
- $s$  – przesunięcie obiektu w zakresie skośnym,
- $\theta$  – kąt padania sygnału satelity.

Różnica odległości mierzonego obiektu od jednej oraz drugiej satelity (lub tej samej satelity ale znajdującej się w różnych pozycjach) ma postać (3.9):

$$\Delta r = -2 \frac{B_n q_s}{R} \quad (3.9)$$

Jedno zobrazowanie jest wzorcowe (reference), a drugie, wtórne (secondary) jest do niego porównywane. W rzeczywistości są one mnożone krzyżowo, piksel po pikselu, pierwszy ze złożonym koniungatem drugiego. Rezultatem takiego działania jest interferogram, a więc macierz różnicy faz między dwoma zobrazowaniami SAR - fazy interferometrycznej  $\Delta\varphi$  zawiniętej w cykle  $2\pi$ , która jest proporcjonalna do ilorazu różnicy odległości  $\Delta r$  (3.9) do długości fali  $\lambda$  (Ferretti i in. 2007):

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda} = -\frac{4\pi B_n q}{\lambda R} \quad (3.10)$$

Zależność (3.10) może być rozbita na różnice faz proporcjonalną do różnicy wysokości pomierzonej z dwóch różnych pozycji satelity oraz na różnicę faz proporcjonalną do różnicy odległości w kierunku wzroku satelity LOS (ang. *line of sight*) (3.11):

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi B_n q}{\lambda R \sin\theta} - \frac{4\pi B_n s}{\lambda R \tan\theta} \quad (3.11)$$

Odejmując we wzorze (3.11) drugi człon, poprzez zastosowanie parametrów precyzyjnych orbit satelitów, uzyskuje się tak zwany spłaszczony interferogram (ang. *flattened interferogram*), który odzwierciedla topografię terenu. Rozpatrywany przypadek dotyczy sytuacji, w której pomiędzy przejściami satelitów nie zarejestrowano ruchu powierzchni terenu. W przeciwnym wypadku faza interferometryczna zawiera informacji zarówno o rzeźbie terenu oraz przemieszczeniu względnym  $d$  (3.12):

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi B_n q}{\lambda R \sin\theta} + \frac{4\pi}{\lambda} d = \Delta\varphi_{\text{topo}} + \Delta\varphi_{\text{defo}} \quad (3.12)$$

Poprzez odjęcie członu związanego z topografią terenu, możliwe jest uzyskanie względnego przemieszczenia powierzchni terenu w kierunku wzroku satelity LOS. Na interferogramie przemieszczenia LOS są przedstawiane graficznie w postaci prążków interferometrycznych. Faza interferometryczna zawinięta jest w cyklach  $2\pi$ , dlatego każda zmiana wartości fali o  $2\pi$  skutkuje pojawieniem się kolejnego prążka, który oznacza przemieszczenie powierzchni o wartość połowy długości fali. W rzeczywistości natomiast faza interferometryczna zawiera nie tylko informację o topografii terenu i przemieszczeniu względnym, ale także szeregu czynników mających wpływ na pomiar InSAR, takich jak warunki atmosferyczne czy odległość między satelitami. Można ją opisać jako sumę kilku składowych (Hanssen 2001):

$$\Delta\varphi = W(\Delta\varphi_{\text{ref}} + \Delta\varphi_{\text{topo}} + \Delta\varphi_{\text{defo}} + \Delta\varphi_{\text{subpx}} + \Delta\varphi_{\text{orb}} + \Delta\varphi_{\text{atm}} + \Delta\varphi_{\text{scat}} + \Delta\varphi_{\text{noise}}) \quad (3.13)$$

gdzie:

$W$  – operator zwiniętej fazy,

$\Delta\varphi_{\text{ref}}$  – składnik referencyjny systemu determinowany wysokością,

$\Delta\varphi_{\text{topo}}$  – przesunięcie fazy związane z topografią terenu,

**$\Delta\varphi_{\text{defo}}$  – przesunięcie fazy związane z deformacjami terenu,**

$\Delta\varphi_{\text{subpx}}$  – różnica między zakładanym centrum fazy, a jej aktualną pozycją

$\Delta\varphi_{\text{orb}}$  – przesunięcie fazowe związane z niedokładnością orbitalną,

$\Delta\varphi_{\text{atm}}$  – przesunięcie fazowe związane z opóźnieniami atmosferycznymi,

$\Delta\varphi_{\text{scat}}$  – przesunięcie fazowe związane z właściwościami rozpraszania obrazu,

$\Delta\varphi_{\text{noise}}$  – przesunięcie fazowe związane z szumem fazowym.

Aby uzyskać całkowite przemieszczenie względne w kierunku LOS w jednostkach miar SI należy przeprowadzić proces rozwijania fazy (ang. *phase unwrapping*). Najprostszym sposobem rozwijania fazy byłoby zsumowanie wartości z sąsiadujących pikseli. Rozwiązanie to byłoby możliwe tylko w przypadku, gdy różnica faz między dwoma pikselami byłaby mniejsza niż  $2\pi$ . Rzeczywista różnica faz między dwoma pikselami interferogramu jest większa (Ferretti i in. 2007). Opracowano wiele metod odwijania fazy. Jako pierwsze były to metody 1D, które zakładały rozwijanie fazy w jednym kierunku (Tribolet 1977). Pod uwagę brane są piksele poziomo lub pionowo. Problemem pozostawała niejednoznaczność fazy, a konkretniej brak znajomości miejsc jej występowania. W przypadku rozwijania 1D następowało rozwijanie fazy w każdym miejscu, również w rejonach występowania niejednoznaczności. W kolejnych latach opracowano wiele algorytmów 2D, które pozwalały analizować ścieżkę pionowo i poziomo jednocześnie i wybierać korzystniejszy kierunek (Goldstein i in. 1988; Ghiglia, Romero 1996; Costantini 1998; Zebker, Lu 1998; Chen, Zebker 2001). Wraz z rozwojem metod InSAR opracowano nowe bardziej zaawansowane algorytmy przetwarzania obrazów, metody szeregów czasowych PSInSAR (ang. *Permanent Scatterers InSAR*) i SBAS (ang. *Small Baseline*) (Ferretti i in. 2001; Berardino i in. 2002). Dodano zatem kolejny wymiar jakim w tym przypadku jest czas  $t$ . Pozwoliło to na rozwój metod 3D rozwijania fazy interferometrycznej (Hooper, Zebker 2007).

Istotnym elementem metod InSAR jest współczynnik korelacji sygnału SAR – koherencja (spójność). Określa dopasowanie sygnałów dwóch obrazów satelitarnych  $v_1$  i  $v_2$ . Wyrażana jest wzorem (3.14) (Pratti i in. 1994):

$$\gamma = \frac{E[v_1 v_2^*]}{\sqrt{E[|v_1|^2]E[|v_2|^2]}} \quad (3.14)$$

gdzie:

$E$  – wartość oczekiwana (w praktyce szacowana za pomocą średniej),

\*- koniugat złożony.

Mierzona jest w zakresie 0 – 1, gdzie 0 oznacza, że faza sygnału uległa degradacji ze względu na czynniki zewnętrzne. Wpływ na koherencje mogą mieć m. in. odległość bazowa między satelitami  $B_n$  lub czasowa między wykonaniem dwóch zobrażeń  $B_t$ . Teoretycznie im mniejsze linie bazowa i czasowa tym lepsze dopasowanie zobrażeń. Czynniki mające wpływ na koherencje były szeroko analizowane przez Villasenor'a i Zebker'a (1992). Wysoką spójnością charakteryzują się tereny o małej zmienności w czasie takie jak tereny zurbanizowane. Niską koherencją charakteryzują się obszary o wysokiej zmienności jak pola uprawne, lasy i itp. Koherencja może służyć jako narzędzie do wykrywania zmian na powierzchni terenu (Preiss, Stacy 2006; Washaya i in. 2018).

Interferometria satelitarna z powodzeniem jest wykorzystywana do monitorowania naturalnych ruchów górotworu (Perki, Mróz 2007; Beladam i in. 2019), spowodowanych między innymi wybuchami wulkanów (Anderson, Poland, 2016), trzęsieniami ziemi (Tung, Masterlak 2016; Suresh, Yarrakula 2019; Atzori i in. 2019) czy ruchami lodowców (Strozzi i in. 2020; Milczarek i in. 2022). Służy do oceny skutków powodzi (Chaabani i in. 2018). Znajduje również szerokie zastosowanie w śledzeniu ruchów wywołanych górnictwem podziemnym, zarówno w Polsce (Przyłucka, Graniczny 2015; Malinowska i in. 2019; Blachowski i in. 2019; Witkowski i in. 2021; Apanowicz 2022) jak i na świecie (Hay-Man i in. 2010; Ng i in. 2017; Chen i in. 2021). W ostatnich latach pojawiło się także kilka publikacji dotyczących integracji InSAR z metodami uczenia maszynowego. Dotyczyły między innymi osuwisk (Du i in. 2019, Crippa i in. 2021), aktywności tektonicznej i wulkanicznej (Lazecky i in. 2020), wykrywania ruchów przed zawaleniem się budynku (Mohamadi i in. 2020) oraz prognozowania deformacji górniczych (Cieślak i in. 2022).

### 3.2.2. Metody przetwarzania zobrażeń satelitarny SAR

Opisany sposób obliczania deformacji w rozdziale 3.2.1, w którym obliczane są interferogramy zawierające informacje o przesunięciu fazowym, nazywany jest metodą interferometrii różnicowej DInSAR (ang. *Differential InSAR*). Jest to podstawowa metoda wyznaczania deformacji, która po raz pierwszy została zastosowana i opisana przez Carnec'a i współautorów (1996). Jednym z kroków tworzenia interferogramu jest rejestracja wzajemna,

czyli dopasowanie geometrii obrazu wtórnego do wzorcowego. Na obu zobrazowaniach wybierane są punkty dopasowania (ang. *tie points*), na podstawie których są one łączone. Rejestracja wzajemna może być wykonana w oparciu o znormalizowany współczynnik korelacji (Liao i in. 2004), z wykorzystaniem szybkiej transformacji Fouriera (ang. *Fast Fourier Transform, FFT*) (Abdelfattah, Nicolas 2004) lub tymczasowo spójnych punktów (ang. *Temporarily Coherent Points, TCP*) (Zhang i in. 2011). Dopasowanie geometrii dwóch zobrazowań jest ważnym krokiem, który ma duży wpływ na wyniki końcowe. W przeszłości były prowadzone badania w tym aspekcie (Weydahl 1991; Lin 1992; Zebker i in. 1994; Guarnieri, Prati 1997; Zou i in. 2006, 2007). Modyfikacją metody DInSAR jest podejście *multi view*. W klasycznym przetwarzaniu SAR rozmiar piksela w kierunku wzroku satelity – zasięgu (range) jest stały, a w kierunku poruszania się satelity – azymutu - kompresowany. W podejściu *multi view* rozmiar piksela w kierunku zasięgu jest interpolowany, a w kierunku azymutu pozostaje stały. Pozwala to na zwiększenie możliwego do wykrywania gradientu deformacji metodą DInSAR (Yang i in. 2010).

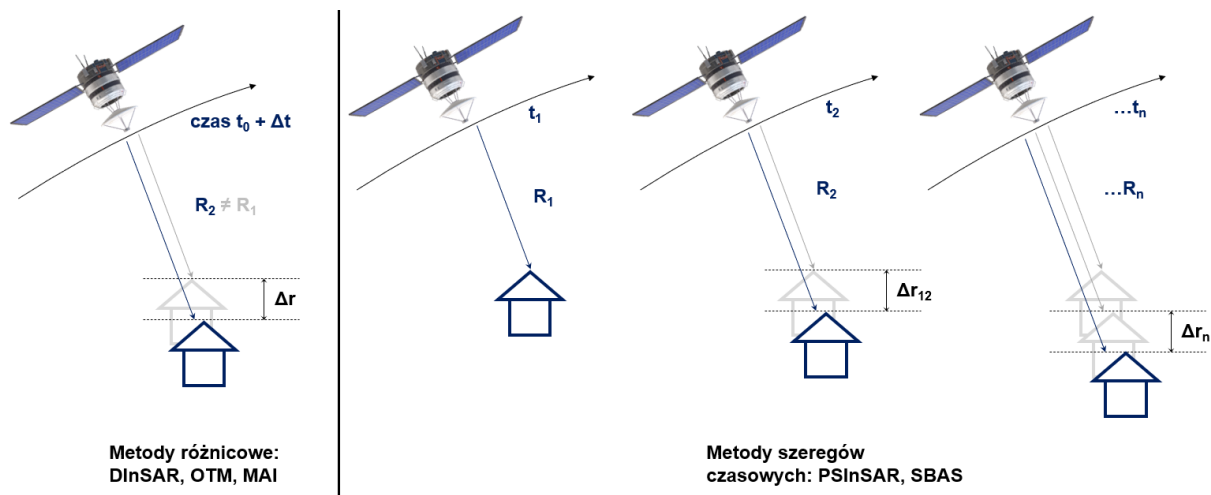
Rozwinięciem metody DInSAR są zaawansowane algorytmy szeregów czasowych MT-InSAR (ang. *Multi Temporal InSAR*). Pierwszym z nich jest metoda permanentnych rozpraszaczy PSInSAR, która umożliwia śledzenie małych milimetrowych ruchów (Ferretti i in. 2000, 2001). W metodzie porównywane jest wiele zobrazowań wtórnych do jednego wzorcowego, z czego powstaje stos interferogramów, na podstawie których określane są deformacje powierzchni. Drugim algorytmem szeregów czasowych jest metoda krótkich linii bazowych SBAS (Berardino i in., 2002). Stos interferogramów powstaje z porównywania wielu zobrazowań wtórnych do wielu zobrazowań wzorcowych. Przy czym pary te są tworzone na podstawie zadanej wartości linii bazowej  $B_n$  oraz czasowej  $B_t$ . Im krótsze linie tym teoretycznie wyższa koherencja, a zatem również lepsza czytelność interferogramów. Rozwinięciem metody SBAS jest metoda MSBAS (ang. *Multidimensional Small Baseline Subset*), która umożliwia przetwarzanie stosu zobrazowań zawierającego dane o różnych parametrach akwizycji (przestrzenne próbkowanie, rozdzielczość, długość fali, polaryzacja itp.) (Samsonov i in. 2013).

Opisane rozwiązania określają deformacje w kierunku wzroku satelity LOS. Metoda MAI (ang. *Multiple Aperture Interferometry*) natomiast, pozwala wyznaczać deformacje w kierunku lotu satelity (ang. *along track direction*) (Bechor, Zebker 2006; Jiang i in. 2017; Mastro i in. 2020).

Poza klasycznymi metodami interferometrycznymi opisanymi wyżej można również stosować metodę śledzenia pikseli OTM/OTP (ang. *Offset Tracking Method/Pixel*). Metoda wykorzystywana jest w pracach zarówno ze zobrazowaniami radarowymi jak również



optycznymi. Mniej dokładna, mogąca określać ruchy o dużych prędkościach (rzędu 500 m/rok). Zaawansowanym rozwinięciem metody OTM jest algorytm AutoRIFT (ang. *Autonomous Repeat Image Feature Tracking*), opisany po raz pierwszy przez Lei i współautorów (2021). Różnice w działaniu metod różnicowych i metod szeregów czasowych pokazano na poniższym schemacie (rys. 3.6).



**Rys. 3.6.** Schemat działania metod różnicowych (DInSAR, OTM, MAI) i metod szeregów czasowych (PSInSAR, SBAS) (opracowanie własne na podstawie <https://site.tre-altamira.com/insar/>, dostęp 23.02.2023).

W badaniach zastosowano metody PSInSAR, SBAS, które szczegółowo opisano w rozdziale 5.

### 3.3. Podsumowanie

W rozdziale przedstawiono stan wiedzy dotyczący zarówno ruchów górotworu wywołanych eksploatacją górniczą jak i interferometrii satelitarnej. W pierwszej części rozdziału przedstawiono podział deformacji górniczych oraz genezę ich tworzenia. Następnie deformacje scharakteryzowano w ujęciu teoretycznym. Jednym z celów pracy jest określenie zasięgu oraz czasu zanikania deformacji z zastosowaniem interferometrii satelitarnej. W związku z tym przedstawiono stan wiedzy dotyczący ich zasięgu wraz z opisem problemu jakim są błędy pomiarowe w przypadku pomiarów bardzo małych przemieszczeń na obrzeżach niecek obniżeniowych. Dokonano charakterystyki wiedzy dotyczącej deformacji występujących po zakończeniu eksploatacji zarówno w ujęciu praktycznym jak i teoretycznym z wyszczególnieniem funkcji czasu Knothego, która obecnie jest wykorzystywana do prognozowania czasu zanikania deformacji na terenach pogórnich.

W drugiej części rozdziału scharakteryzowano stan wiedzy dotyczący metody InSAR. W pierwszej kolejności opisano wykorzystywaną aparaturę, czyli radary typu SAR, a następnie przedstawiono krótki rys historyczny dotyczący misji satelitarnych dedykowanych do

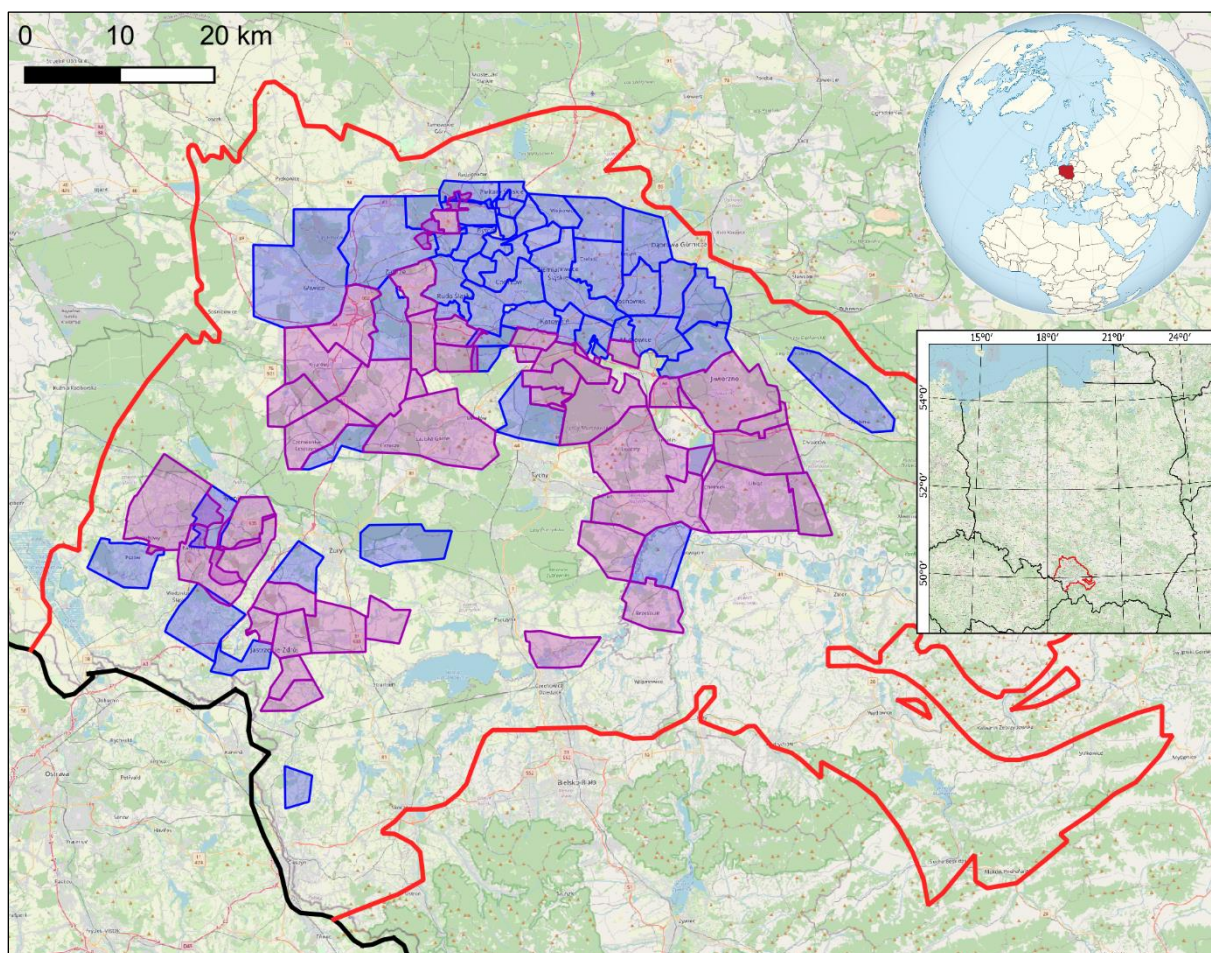
pomiarów InSAR wraz ze wskazaniem przyszłości tej technologii. W kolejnej części rozdziału opisano schemat działania pomiaru metodą interferometrii satelitarnej oraz krótko scharakteryzowano obecnie wykorzystywane metody przetwarzania obrazów satelitarnych takie jak metody różnicowe: DInSAR, MAI, OTM oraz metody szeregów czasowych: PSInSAR i SBAS.

## 4. Identyfikacja rejonów badawczych

### 4.1. Górnośląskie Zagłębie Węglowe

#### 4.1.1. Informacje ogólne

Górnośląskie Zagłębie Węglowe położone jest w południowej części Polski oraz w północno – wschodniej części Republiki Czeskiej. Powierzchnia GZW wynosi około 5400 km<sup>2</sup>, w tym około 4250 km<sup>2</sup> znajduje się po stronie polskiej. Złoże węgla kamiennego jest wielopokładowe. Działalność górnicza w GZW prowadzona jest nieprzerwanie od czasów średniowiecza. Na początku była to eksploatacja rud cynku, ołowiu oraz srebra, która zakończyła się w 1989 roku. Wydobycie węgla kamiennego w dalszym ciągu jest intensywne, choć po 1979 roku systematycznie obniża się (Kowalski 2020). Obecnie po polskiej stronie znajduje się 21 obszarów czynnych kopalń (30 ruchów) oraz 46 zlikwidowanych (rys. 4.1).



**Rys. 4.1.** Granica Górnośląskiego Zagłębia Węglowego po polskiej stronie (linia czerwona), wraz z lokalizacją obszarów górnicznych czynnych kopalń węgla kamiennego (kolor fioletowy) i zlikwidowanych (kolor niebieski), stan na luty 2023 – układ PL-2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne na podstawie Kowalski 2020).

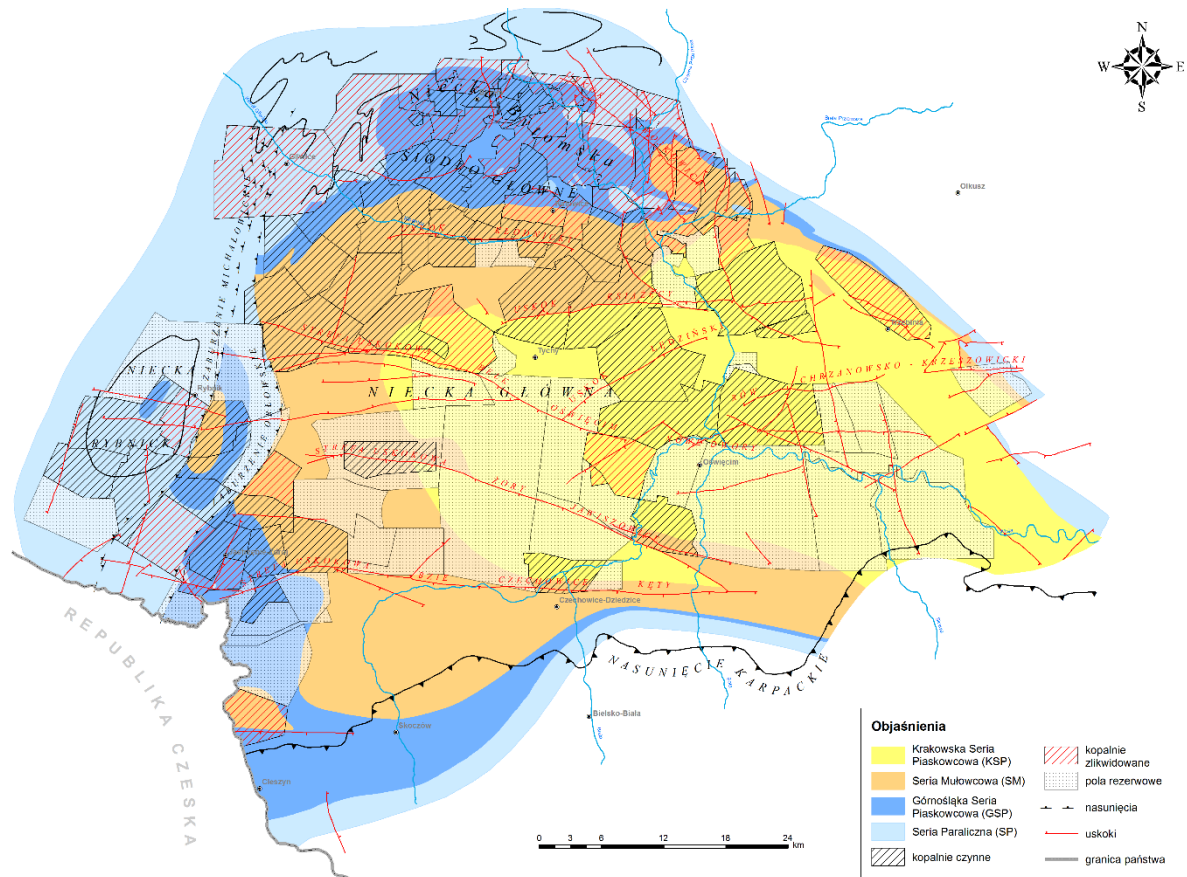
W 2023 roku w części północno – wschodniej GZW eksploatuje jedynie kopalnia „Bobrek – Piekary” Ruch Bobrek oraz w jej sąsiedztwie dwa prywatne Zakłady Górnicze „Siltech” i EKO – PLUS.

Wielopokładowa eksploatacja, prowadzona na przestrzeni lat spowodowała przekształcanie się powierzchni terenu i występowanie deformacji górniczych, a w następstwie również szkody górnicze, co jest szczególnie uciążliwe dla mieszkańców aglomeracji. W granicach GZW znajduje się jeden z największych obszarów miejskich Unii Europejskiej, czyli Górnośląsko – Zagłębiowska Metropolia (GZM), składająca się z 41 sąsiadujących ze sobą miast i gmin, zajmująca łączną powierzchnię około 2500 km<sup>2</sup> i licząca około 2,3 mln mieszkańców (<https://metropoliagzm.pl>, dostęp 15.02.2023).

#### *4.1.2. Zarys warunków geologicznych*

W GZW serię warstw zalegających do głębokości około 3000 m obejmuje karbon. Podzielony jest na 3 główne grupy: warstwy łęgowe (pokłady nr 100 – 499), warstwy siodłowe (pokłady nr 501 – 510) oraz warstwy brzeżne (pokłady nr 600 – 900). Warstwy łęgowe zalegają w centralnej i południowo-wschodniej części obszaru GZW. Najbardziej węglonośne są warstwy siodłowe, ze względu na liczbę pokładów oraz ich grubość dochodzącą do 20 m. Najgrubszy z nich, pokład 510 ma miąższość lokalnie dochodzącą do 22 m. Utwory karbońskie przykryte są nadkładem, który tworzą młodsze warstwy triasu, jury i kredy. W północnej i wschodniej części GZW zlokalizowane są warstwy triasu, w których występują zjawiska krasowe. W rejonie Bytomia ich miąższość dochodzi do około 200 m (Kwiatek i in. 1997). W południowej i zachodniej części nadkład stanowią głównie warstwy czwartorzędu i trzeciorzędu. W rejonie Rybnika ich miąższość wynosi około 800 m. Górotwór na przemian zbudowany jest z ilowców, mułowców oraz piaskowców, w których znajdują się pokłady węgla kamiennego. Budowa geologiczna górotworu ma istotny wpływ na kształtowanie się deformacji górniczych na powierzchni. Wpływa między innymi na zasięg oraz wielkość deformacji, a także na czas ich ujawniania się na powierzchni (Kowalski 2020).

Utwory karbońskie zalegają nieregularnie w kształcie kopuł i niecek geologicznych. Do największych niecek należą: niecka główna zlokalizowana w centrum obszaru GZW, niecka bytomska na północy oraz niecka rybnicka na zachodzie (rys. 4.2). Nachylenie warstw z reguły nie przekracza 15°. Górotwór GZW poprzecinany jest dużą liczbą uskoków geologicznych o wysokości zrzutu dochodzącej do kilkuset metrów. Występuje też duża liczba uskoków o małe wysokości zrzutu, nie przekraczającej 2 m.



**Rys. 4.2.** Lokalizacja niecek geologicznych i głównych uskoków tektonicznych w GZW (Konopko i in. 2013).

Warunki hydrogeologiczne są zróżnicowane i mają związek z występowaniem warstw nadkładu nad karbonem. W rejonie niecki bytomskiej występuje układ, w którym nad karbonem zalegają warstwy triasu i czwartorzędu, a dopływy do kopalń wynoszą od 10 do 25 m<sup>3</sup>/min. W południowej i zachodniej części zagłębia zlokalizowany jest układ, w którym karbon występuje pod warstwami trzeciorzędu i czwartorzędu. Warstwy trzeciorzędu składają się z ilów i ilowców, które spełniają rolę pewnej izolacji i powoduje małe dopływy do kopalń w granicach 5 m<sup>3</sup>/min. Obszary gdzie występują warstwy o charakterze izolacyjnym są predysponowane do powstawania zalewisk na powierzchni (Kowalski 2015).

#### 4.1.3. Zarys warunków górniczych

Najstarsze informacje o eksploatacji węgla kamiennego w GZW pochodzą z 1657 roku. Dotyczą eksploatacji węgla kamiennego w rejonie dzielnicy Murcki i Kostuchny w Katowicach. W 1924 roku, w GZW działały 94 kopalnie (Makowski 1924), które w 1922 roku wyeksploatowały łącznie 34,4 mln Mg węgla kamiennego (Frużyński 2012). W okresie międzywojennym ilość wydobywanego węgla miało charakter zmienny z uwagi na kryzys gospodarczy, co w konsekwencji doprowadziło do zatrzymania działalności 16 kopalń. Po 1945 roku w GZW działały 74 kopalnie. Na przestrzeni lat ta liczba zmieniała się ze względu na

różne uwarunkowania. Niektóre kopalnie likwidowano, scalano lub otwierano nowe. Do roku 1978 wydobywanie węgla kamiennego z roku na rok systematycznie rosło osiągając poziom około 200 mln Mg. Po 1978 roku wydobywanie węgla kamiennego malało i w 2018 roku wyniosło 63,4 mln Mg. Na przestrzeni lat eksploatację prowadzono różnymi systemami takimi jak komorowy, ubierkowy, zabierkowy lub ścianowy z podszkłą hydrauliczną. Obecnie węgiel kamienny najczęściej wydobywa się systemem ścianowym z zawałem skał stropowych ze względów ekonomicznych. Wyjątkami jest eksploatacja prowadzona według specjalnych uwarunkowań jak na przykład pod śródmieściem Bytomia.

Średnia głębokość eksploatacji wynosi około 800 m, a wysokość eksploatowanego pokładu jest równa z reguły 1,8 do 4 m. W niektórych przypadkach grube pokłady są eksploatowane z podziałem na warstwy o wysokości 2,0 – 3,5 m.

#### *4.1.4. Charakterystyka rejonów badawczych*

##### 4.1.4.1. Wprowadzenie

W celu przeprowadzenia badań, wytypowano 8 rejonów badawczych z GZW. Siedem obszarów dotyczyło eksploatacji pojedynczych ścian oraz ich grupy, w ostatnich kilku latach. W tych rejonach przeprowadzono badania dotyczące możliwości wykrywania dużych deformacji metodami InSAR oraz ich zasięgu, a podstawowym narzędziem walidacyjnym były pomierzone obniżenia powierzchni metodami geodezyjnymi.

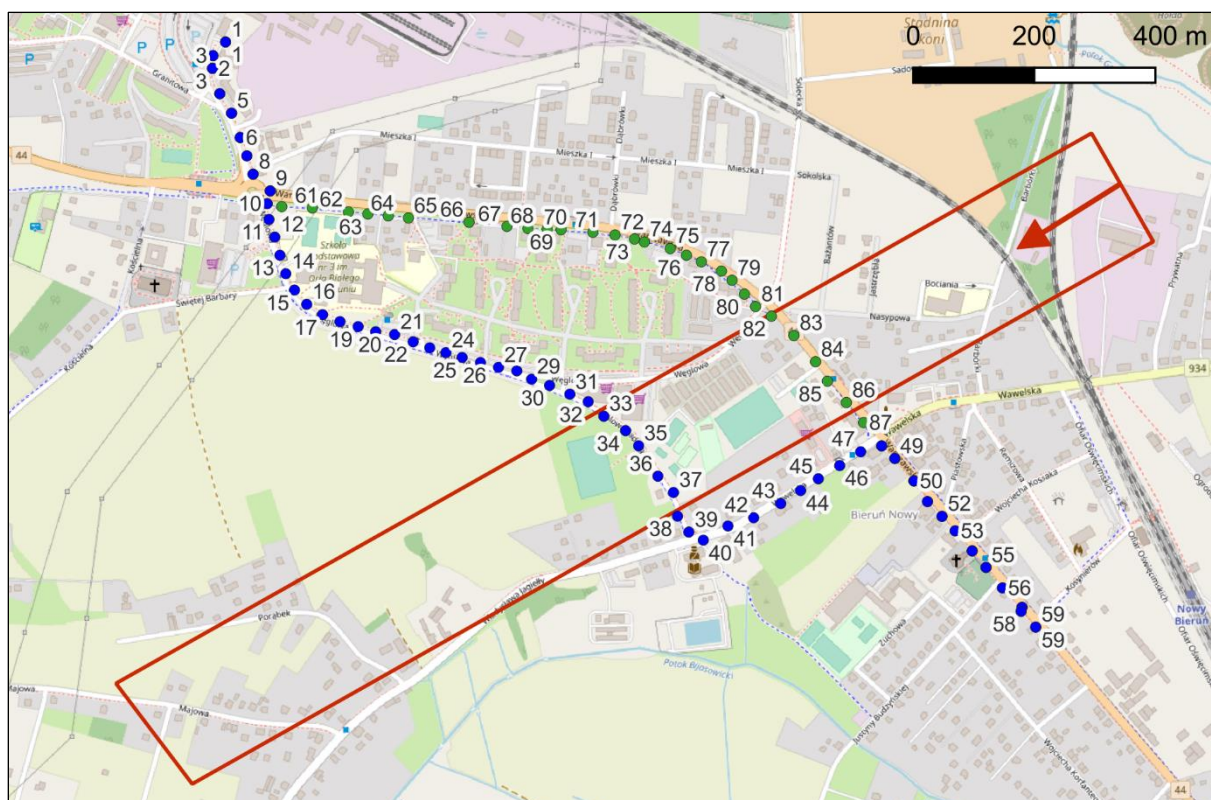
Rejony badawcze (1-7) były następujące:

- 1) KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast, rejon Bierunia Nowego,
- 2) KWK Bobrek – Piekary Ruch Bobrek, rejon dzielnicy Miechowice.
- 3) ZG EKO-PLUS Sp. z o.o., rejon autostrady A1 w Bytomiu.
- 4) KWK ROW Ruch Marcel, Markłowice.
- 5) KWK Ruda Ruch Pokój (obecnie SRK Oddział KWK Pokój I - Pokój II), dzielnica Wirek w Rudzie Śląskiej.
- 6) KWK Ruda Ruch Halemba, dzielnica Halemba w Rudzie Śląskiej,
- 7) KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka, rejon drogi DW933 ul. Pszczyńskiej w Jastrzębiu Zdroju.

Dodatkowym, ósmym rejonem badawczym było śródmieście Bytomia, gdzie zakończono eksploatację górnictwem w filarze ochronny w 2015 roku (szczegółowy opis patrz rozdział 4.2). Na tym obszarze przeprowadzono badania dotyczące czasu zanikania deformacji górniczych.

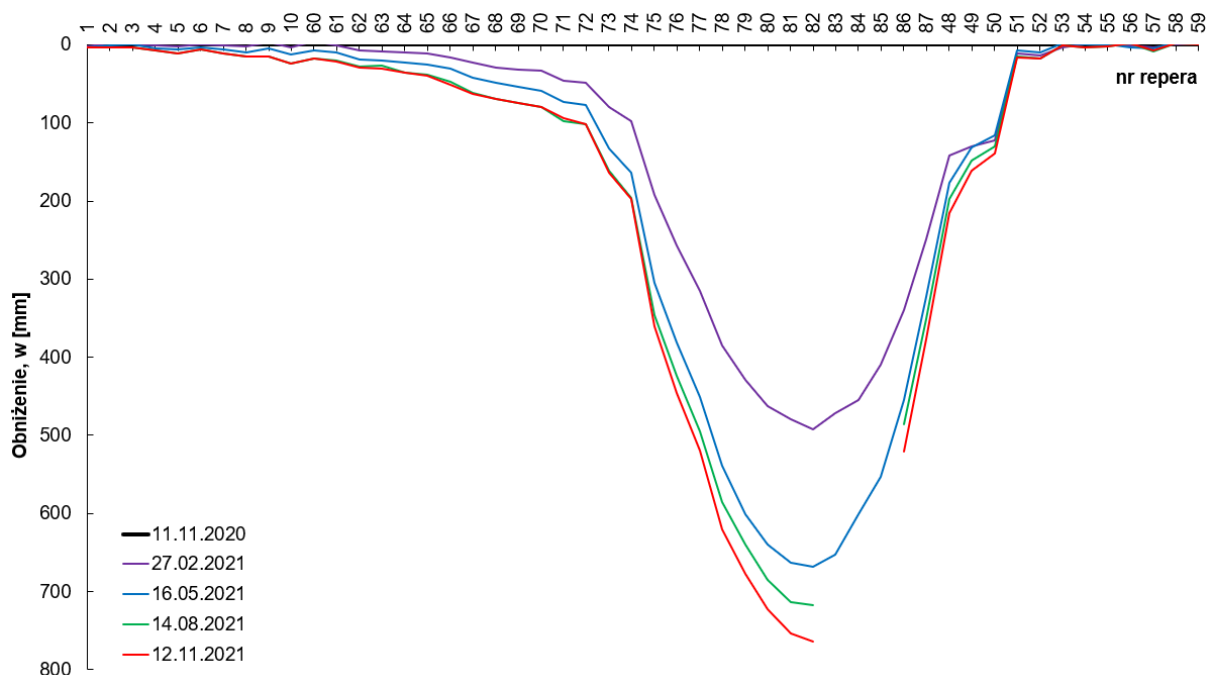
#### 4.1.4.2. KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast, rejon Bierunia Nowego

Na terenie górniczym kopalni Piast – Ziemowit Ruch Piast wykorzystano pomierzone obniżenia wzdłuż ulic Warszawskiej oraz Węglowej w Bieruniu, spowodowane eksploatacją drugiej, dolnej warstwy pokładu 209 ścianą 373a, o długości równej około 200 m i wybiegu równym około 1850 m. Średnia głębokość eksploatacji wynosiła 708 m, a średnia miąższość 2,3 m. Pokład nachylony był średnio 5° w kierunku NE. Eksploatację prowadzono w okresie 01.06.2020 - 01.11.2021 (rys. 4.3).

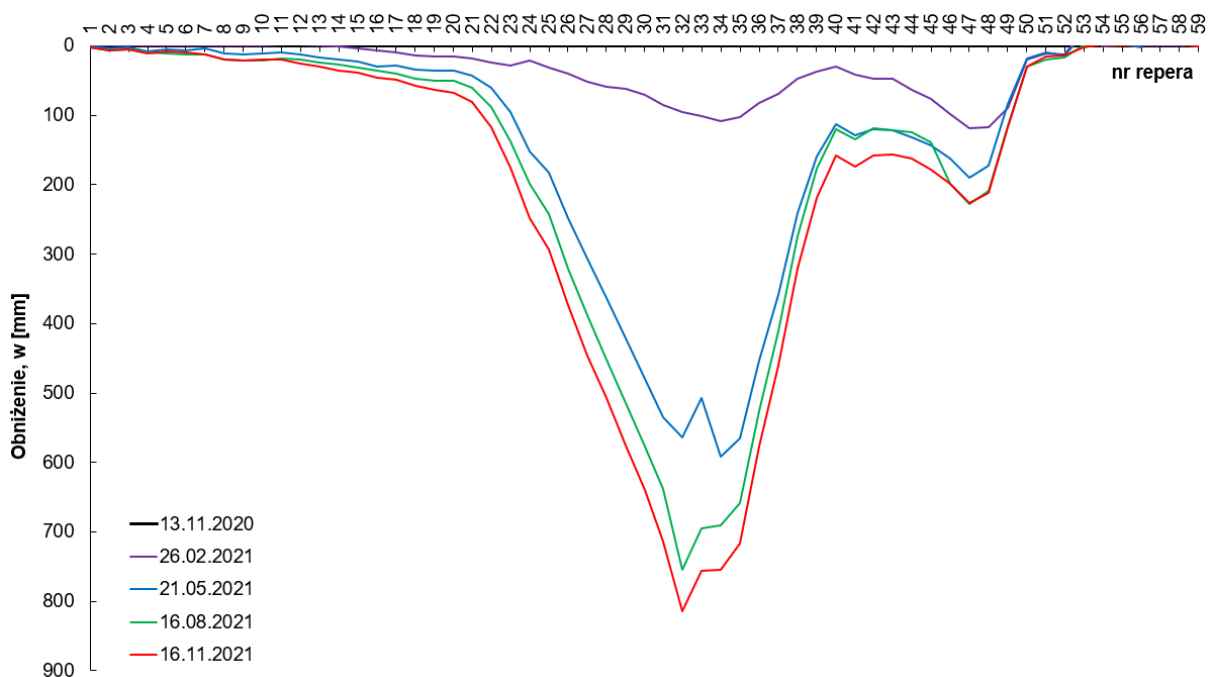


**Rys. 4.3.** Lokalizacja ściany nr 373a w pokładzie 209 wraz z przebiegiem linii pomiarowych zlokalizowanych wzdłuż ulicy Warszawskiej (punkty zielone) oraz Węglowej (punkty niebieskie) w Bieruniu – układ PL2000/6, EPSG: 2177 (opracowanie własne).

Pomiary na liniach rozpoczęto w listopadzie 2020 roku i wykonano 5 cykli pomiarowych w 3 miesięcznych interwałach. W rejonie dna niecki największe obniżenie, na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ulicy Warszawskiej, zmierzono na punkcie nr 82, które wyniosło 764 mm (rys. 4.4). Na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ulicy Węglowej największe obniżenie zmierzono na punkcie nr 32, które wyniosło 815 mm (rys. 4.5).



**Rys. 4.4.** Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu w okresie 11.11.2020 – 12.11.2021 spowodowane eksploatacją ściany 373a w pokładzie 209 (opracowanie własne).



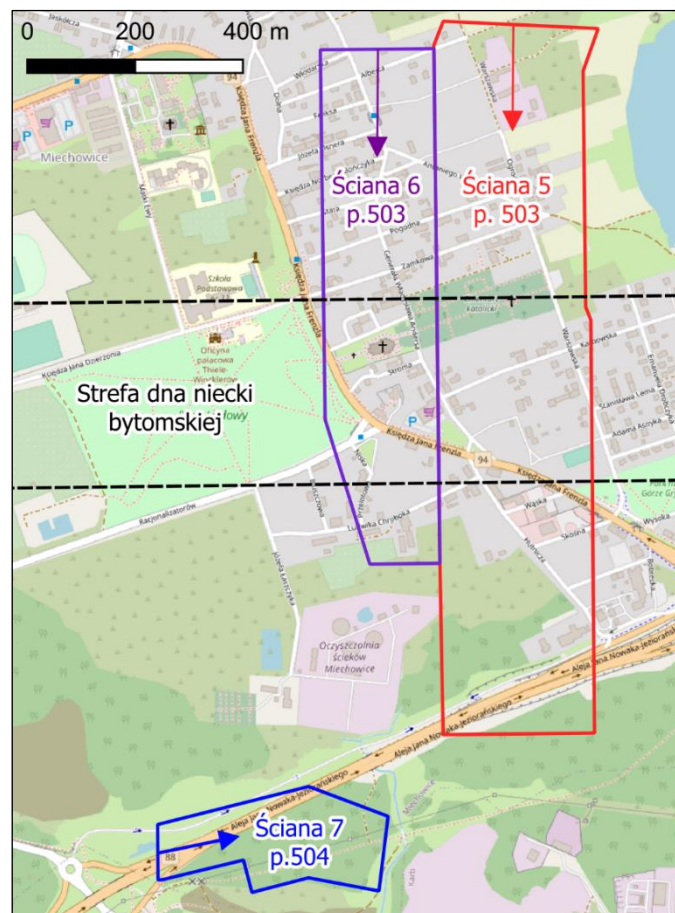
**Rys. 4.5.** Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. Węglowej w Bieruniu w okresie 13.11.2020 – 16.11.2021 spowodowane eksploatacją ściany 373a w pokładzie 209 (opracowanie własne).

#### 4.1.4.3. KWK Bobrek – Piekary Ruch Bobrek, dzielnica Miechowice w Bytomiu

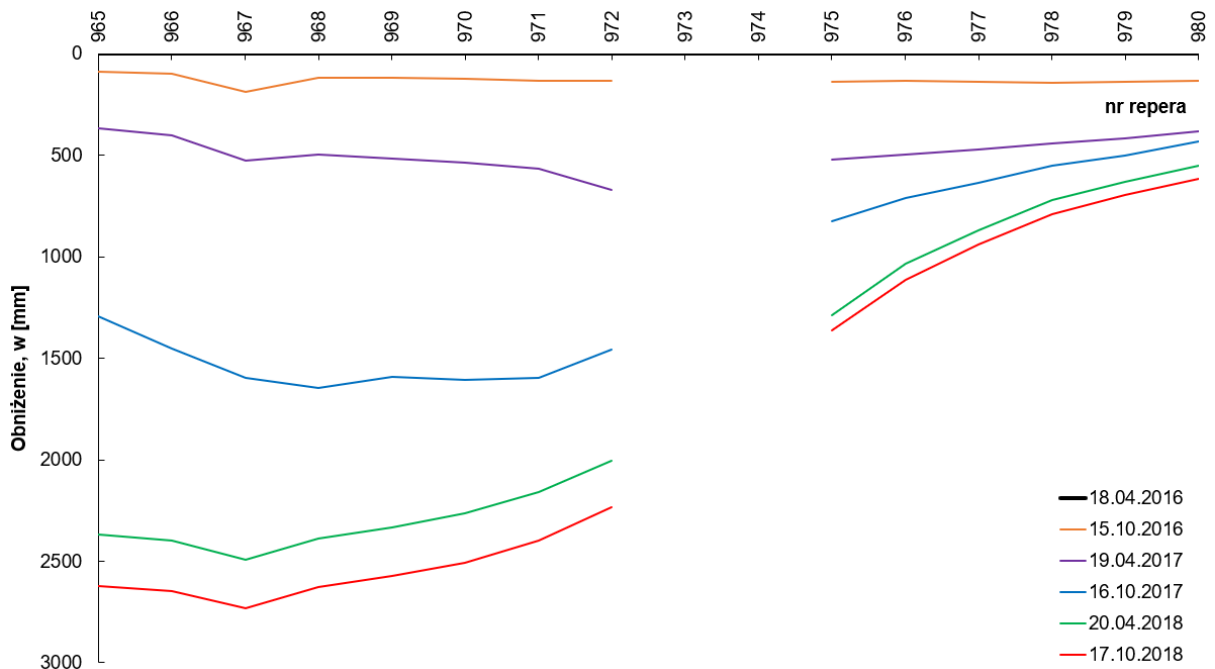
Na terenie górnictwym kopalni Bobrek – Piekary Ruch Bobrek analizowano rejon dzielnicy Miechowice w Bytomiu, w którym była prowadzona eksploatacja w pokładzie 503 i 504. Jest to obszar intensywnej, wielokrotnej eksploatacji począwszy od 1965 roku. W pracy wykorzystano dane dotyczące 3 ścian. Dwie z nich, ściany nr 5 i 6, eksploatowane były



w pokładzie 503 w okresie od marca 2016 roku do czerwca 2018 roku. Długość ścian wynosiła odpowiednio około 290 i 200 m, a wybieg około 1300 i 1000 m. Eksploatację prowadzono na średniej głębokości równej około 680 m, a jej średnia miąższość wynosiła około 2,1 m. Pokład w tym miejscu nachylony jest średnio około  $4^\circ$  w kierunku NW. Przy czym pole eksploatacyjne zlokalizowane jest w dnie niecki bytomskiej, a ściany wybierano w kierunku NS co sprawia, że północna część ścian nachylona jest w kierunku S, a południowa w kierunku N. Trzecia ściana nr 7, eksploatowana była w pokładzie 504 w okresie od kwietnia 2018 roku do kwietnia 2019 roku. Ściana znajdowała się na głębokości około 680 m, a jej miąższość wynosiła średnio 2,7 m. Pokład nachylony był  $10^\circ$  w kierunku NE. W pracy wykorzystano również pomiary geodezyjne obniżeń powierzchni przeprowadzone na linii, której punkty umieszczone są wzdłuż ulicy Karbowskiej. Zmierzone obniżenia są skutkiem eksploatacji opisanych ścian 5 i 6 (rys. 4.6). Pomiary na linii zaczęto wykonywać w kwietniu 2016 roku w półrocznych cyklach pomiarowych. Ostatni pomiar związany z opisaną eksploatacją wykonano w październiku 2018 roku. Największe obniżenie zmierzono na punkcie nr 967 i wyniosło 2784 mm (rys. 4.7).



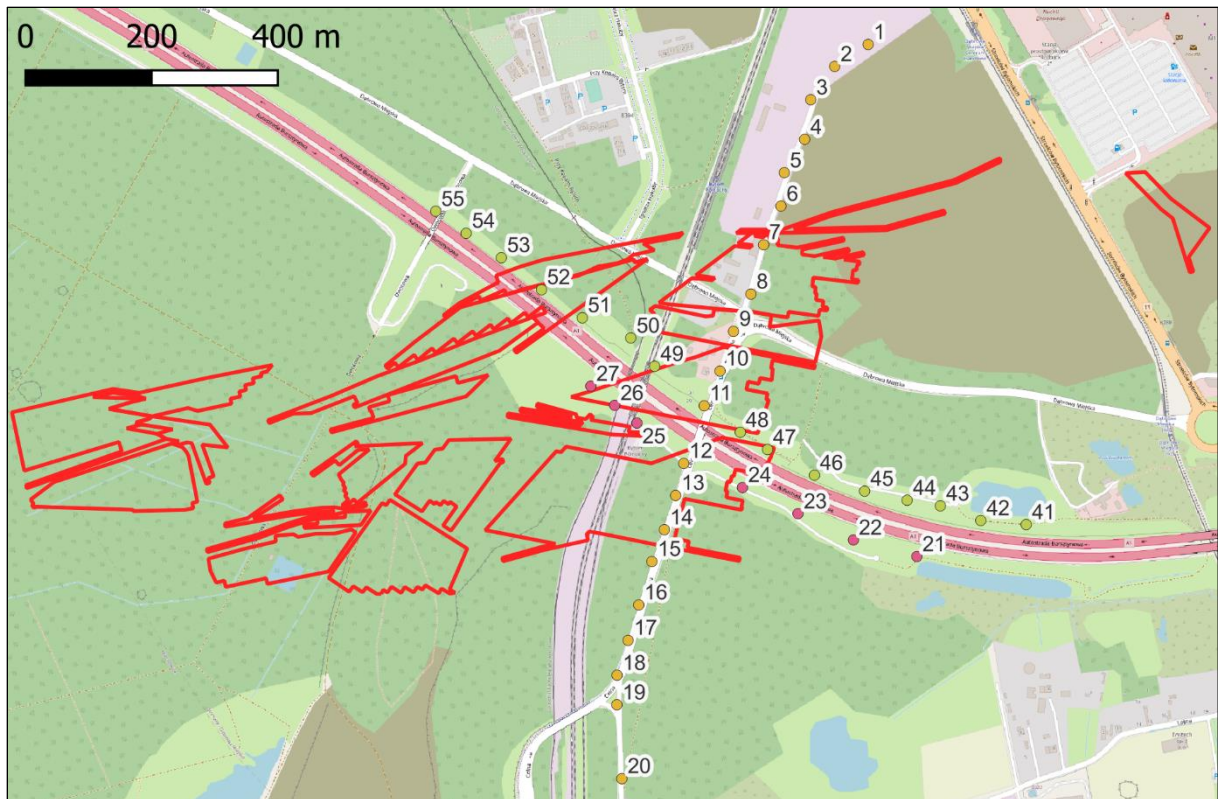
**Rys. 4.6.** Lokalizacja ścian nr 5 i 6 w pokładzie 503 oraz ściany 7 w pokładzie 504 wraz z przebiegiem linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ulicy Karbowskiej w Bytomiu, w dzielnicy Miechowice (punkty niebieskie) oraz z lokalizacją strefy dna niecki bytomskiej – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).



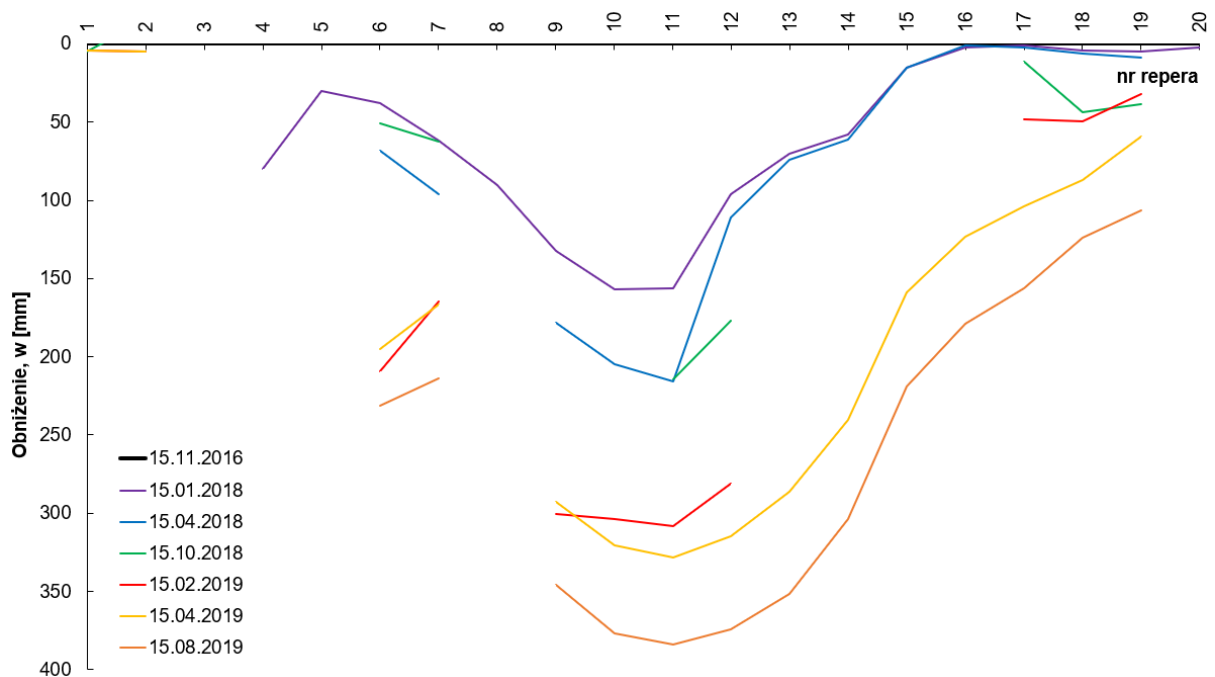
**Rys. 4.7.** Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. Karbowskiej w Bytomiu, w dzielnicy Miechowice w okresie 18.04.2016 – 17.10.2018 spowodowane eksploatacją ścian 5 i 6 w pokładzie 503 (opracowanie własne).

#### 4.1.4.4. ZG EKO – PLUS Sp. z o. o., rejon autostrady A1 w Bytomiu

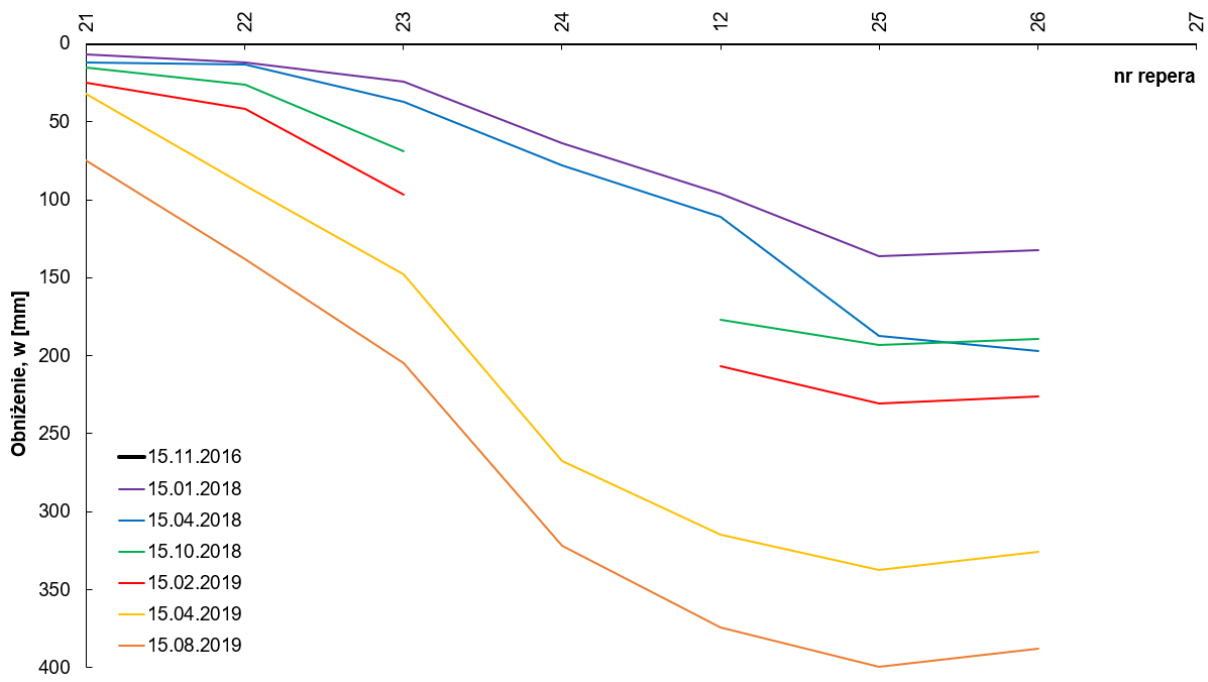
Na obszarze górniczym ZG EKO-PLUS zlokalizowanym w północnej części Bytomia prowadzona jest eksploatacja chodnikami w pokładzie 510 na głębokości około 500 m (rys. 4.8). Chodniki likwidowane są poprzez podsadanie. W pracy wykorzystano pomiary obniżeń wykonywane na 3 liniach pomiarowych (rys. 4.9 - 4.11). Pierwsza z nich zlokalizowana jest wzdłuż ulicy Celnej (przebieg NE-SW), a dwie pozostałe (przebieg SE-NW) wzdłuż autostrady A1 od strony południowej (linia nr 2) i północnej (linia nr 3). Pierwszy pomiar na liniach wykonano w listopadzie 2016 roku, a następny dopiero ponad rok później, w styczniu 2018 roku. Następnie obniżenia mierzono w kilku interwałach co kilka miesięcy do sierpnia 2019 roku. Największe obniżenie zmierzono na linii nr 2, które wyniosło 399 mm.



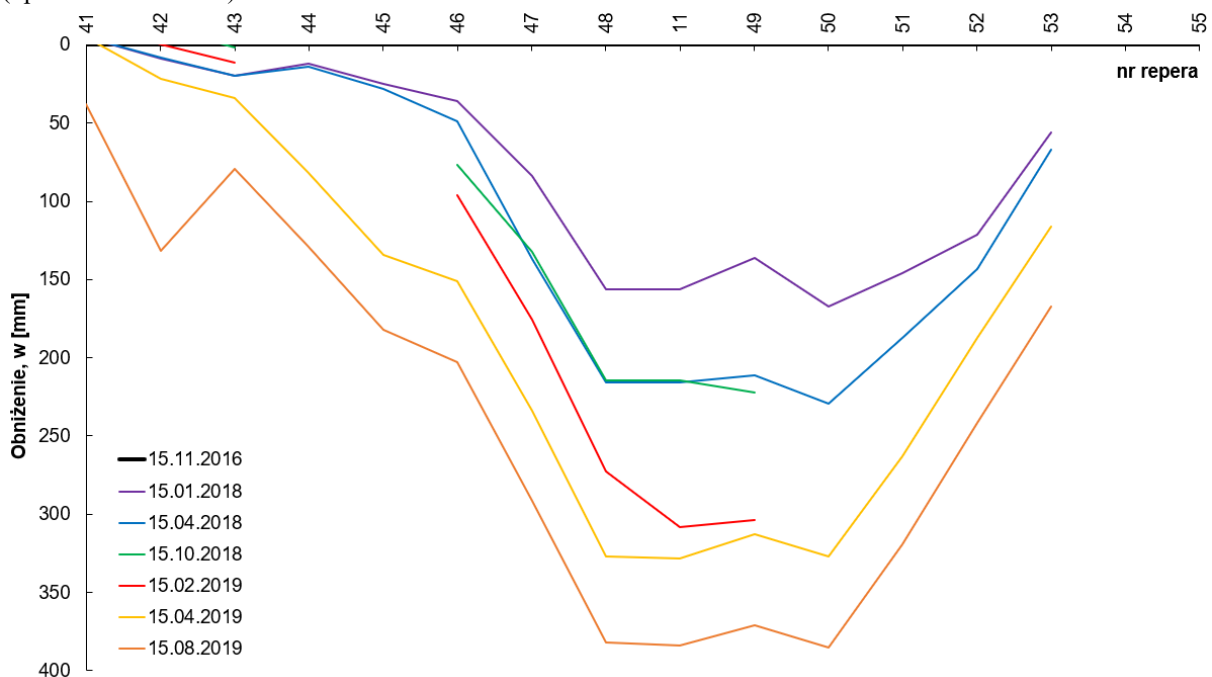
**Rys. 4.8.** Lokalizacja parcel eksploatacyjnych Z.G. EKO-PLUS Sp. z o.o. oraz linii pomiarowych wzdłuż ul. Celnej i autostrady A1 w Bytomiu – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).



**Rys. 4.9.** Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. Celnej w Bytomiu w okresie 15.11.2016 – 15.08.2019 spowodowane eksploatacją górnictwą prowadzoną przez ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne).



**Rys. 4.10.** Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż autostrady A1 (strona południowa) w Bytomiu w okresie 15.11.2016 – 15.08.2019 spowodowane eksploatacją górniczą prowadzoną przez ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne).

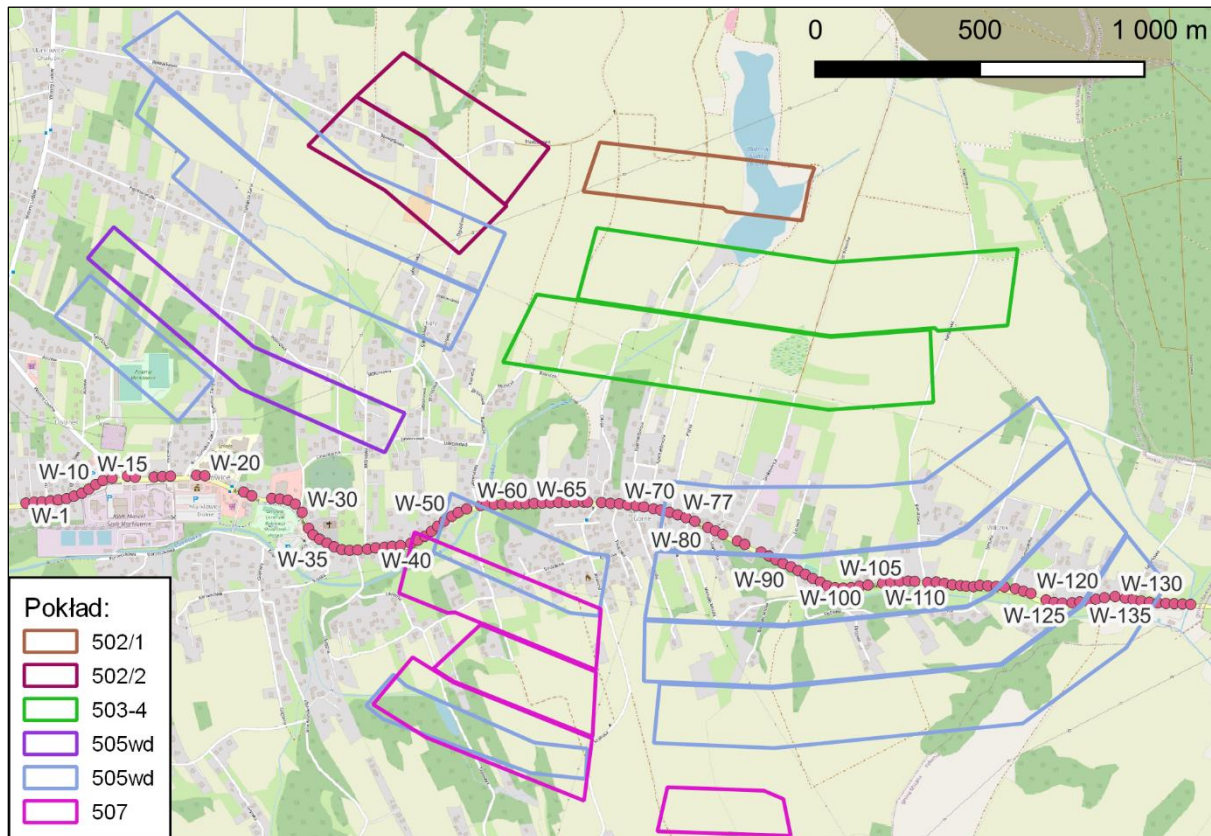


**Rys. 4.11.** Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż autostrady A1 (strona północna) w Bytomiu w okresie 15.11.2016 – 15.08.2019 spowodowane eksploatacją górniczą prowadzoną przez ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne).

#### 4.1.4.5. KWK ROW Ruch Marcel, Marklowice

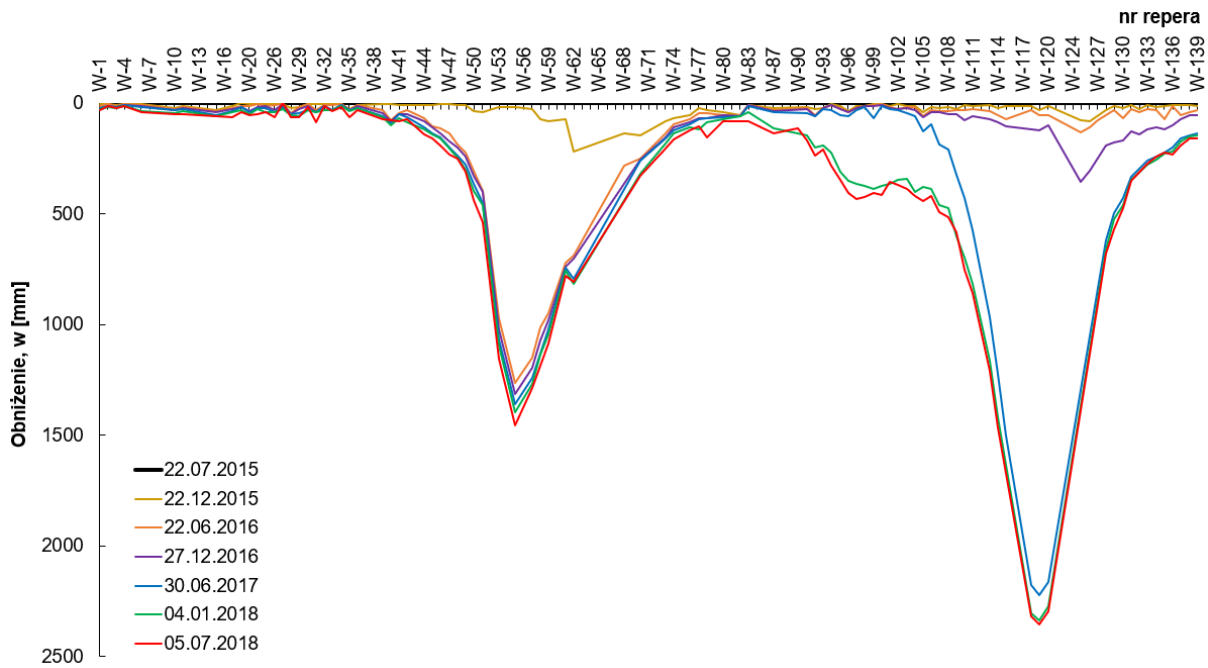
Na obszarze kopalni ROW Ruch Marcel, w okolicach gminy Marklowice prowadzona jest intensywna eksploatacja od 1978 r. W pracy wykorzystano obniżenia powstałe na skutek eksploatacji 19 ścian w 6 pokładach na północ i południe od głównej ulicy Wyzwolenia (rys.

4.12). Średnia głębokość całego pola eksploatacyjnego wynosiła około 530 m, a średnia miąższość wybieranych ścian około 3 m. Pokłady w rejonie ul. Wyzwolenia nachylony jest około  $12^\circ$  w kierunku SE. Analizowana eksploatacja górnicza była prowadzona w okresie od maja 2014 roku do grudnia 2021 roku.

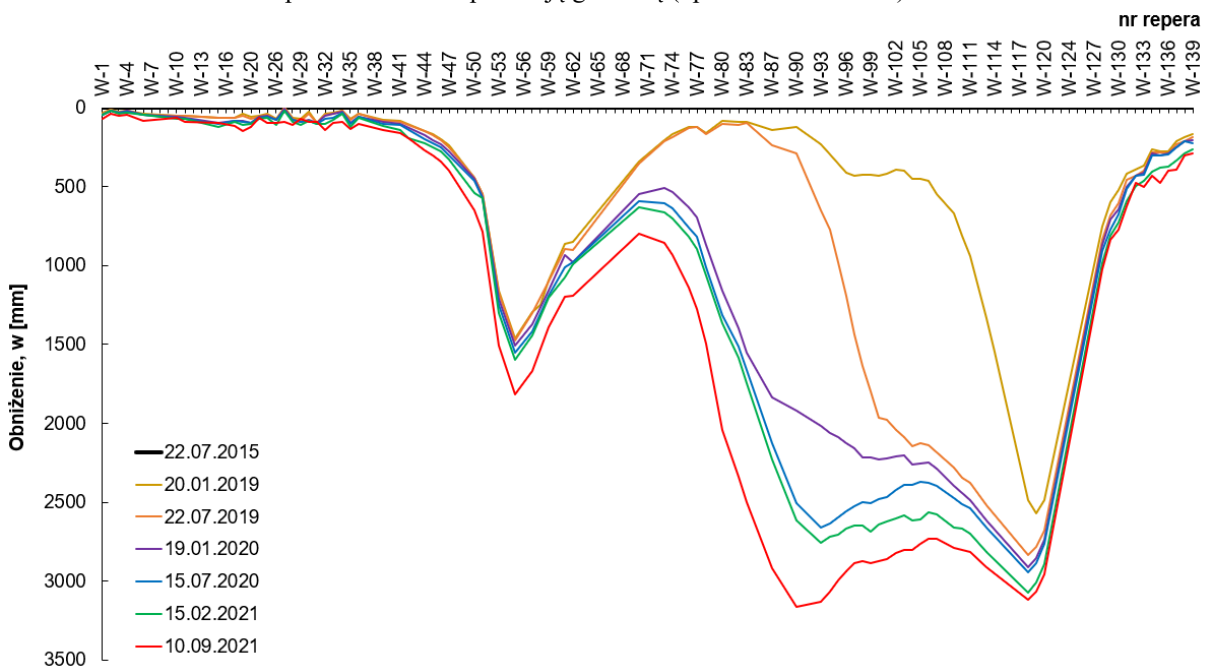


**Rys. 4.12.** Lokalizacja ścian eksploatacyjnych w poszczególnych pokładach względem linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).

Pomiary wykonywano na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Wyzwolenia w okresie od lipca 2015 do września 2021 roku. W pierwszej kolejności, do lipca 2018 roku utworzyły się dwie niecki obniżeniowe, których dna zlokalizowane były w okolicach punktów W-55 (okolice adresu ul. Wyzwolenia 100 i 102) oraz W-118 (okolice adresu ul. Wyzwolenia 16). Maksymalne zmierzone obniżenie wyniosło odpowiednio 1453 i 2319 mm (rys. 4.13). Następnie w okresie od lipca 2018 do września 2021 roku nastąpiło stopniowe powiększanie się niecki zlokalizowanej w pobliżu punktu W-118 i rozszerzenie dna niecki między punkty W-90 i W-118. Największe obniżenie zmierzono na punkcie W-90, które wyniosło 3160 mm (rys. 4.14).



**Rys. 4.13.** Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach (część 1) w okresie 22.07.2015 – 05.07.2018 spowodowane eksploatacją górnictw (opracowanie własne).

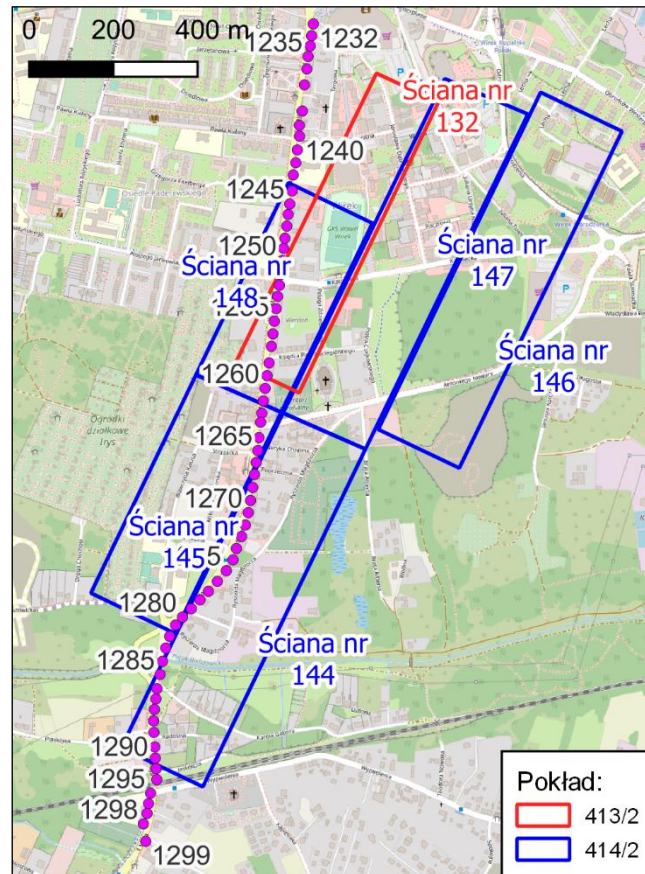


**Rys. 4.14.** Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach (część 2) w okresie 22.07.2015 – 10.09.2021 spowodowane eksploatacją górnictw (opracowanie własne).

#### 4.1.4.6. KWK Ruda Ruch Pokój (obecnie SRK Oddział KWK Pokój I – Pokój II), dzielnica Wirek w Rudzie Śląskiej

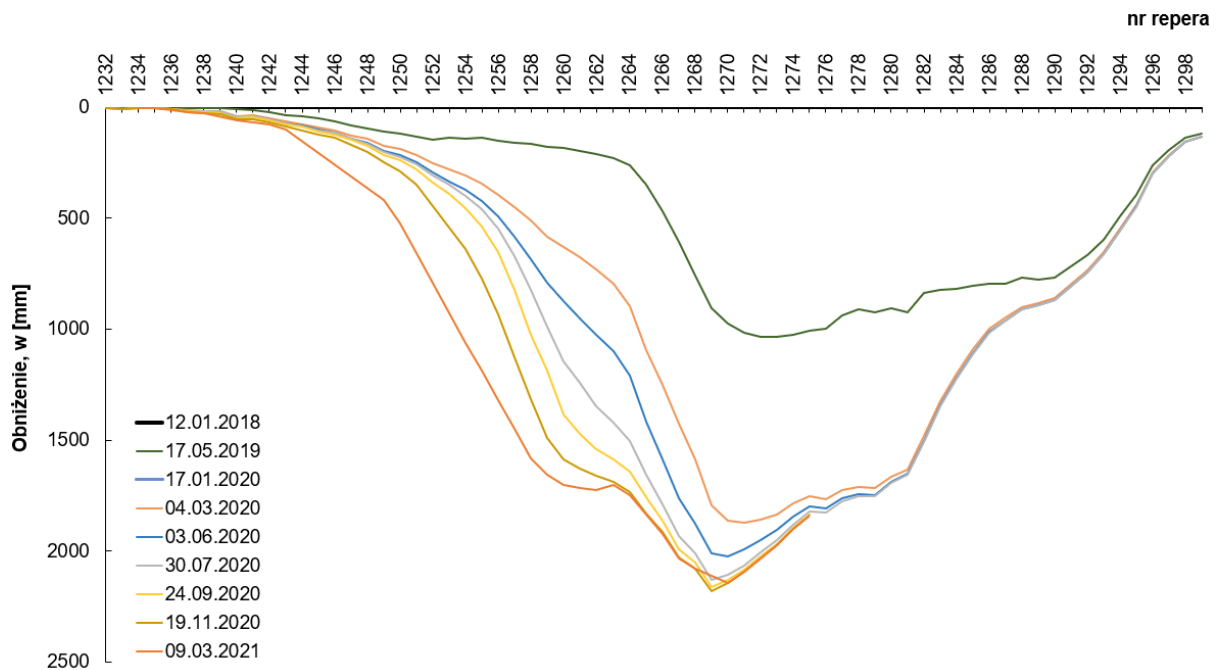
Pod dzielnicą Wirek w Rudzie Śląskiej kopalnia Ruda Ruch Pokój prowadziła intensywną eksploatację. Od 1930 r. i do 2000 r. wybrano pokład o sumarycznej miąższości równej około 27 m. Po 2000 r. wyeksploatowano łącznie 24 ściany w 4 pokładach o łącznej sumarycznej miąższości równej około 9 m. W pracy wykorzystano dane dotyczące 6 ścian

wybranych z pokładów 413/2 i 414/2 (rys. 4.15). W pokładzie 413/2 była to ściana nr 132 eksploatowana w okresie od kwietnia 2015 do marca 2016 roku. Ściana zlokalizowana była na głębokości około 450 m, a jej średnia miąższość wynosiła 2,1 m. W pokładzie 414/2 były to ściany nr 144, 145, 146, 147 i 148 wybierane w okresie od lipca 2017 do lutego 2021 roku. Eksploatację prowadzono na średniej głębokości równej około 530 m, a średnia miąższość wynosiła 2,1 m. Opisywane pokłady pod dzielnicą Wirek w Rudzie Śląskiej nachylone są około 7° w kierunku NW.



**Rys. 4.15.** Lokalizacja ścian eksploacyjnych w pokładach 413/2 i 414/2 wraz z przebiegiem linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ulicy 1-go Maja w Rudzie Śląskiej w dzielnicy Wirek (punkty fioletowe) – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).

W pracy wykorzystano również pomiary geodezyjne obniżeń powierzchni zmierzone na linii zlokalizowanej wzdłuż ul. 1-go Maja w Rudzie Śląskiej. Zmierzone obniżenia są skutkiem eksploatacji 5 ścian z pokładu 414/2. Pierwszy pomiar wykonano w styczniu 2018 roku, a dwa kolejne odpowiednio w maju 2019 i styczniu 2020 roku. Następnie pomiary prowadzono do marca 2021 roku w miesięcznych lub kilkumiesięcznych interwałach. Największe obniżenie zmierzono na reperze nr 1270, które wyniosło 2144 mm (rys. 4.16).

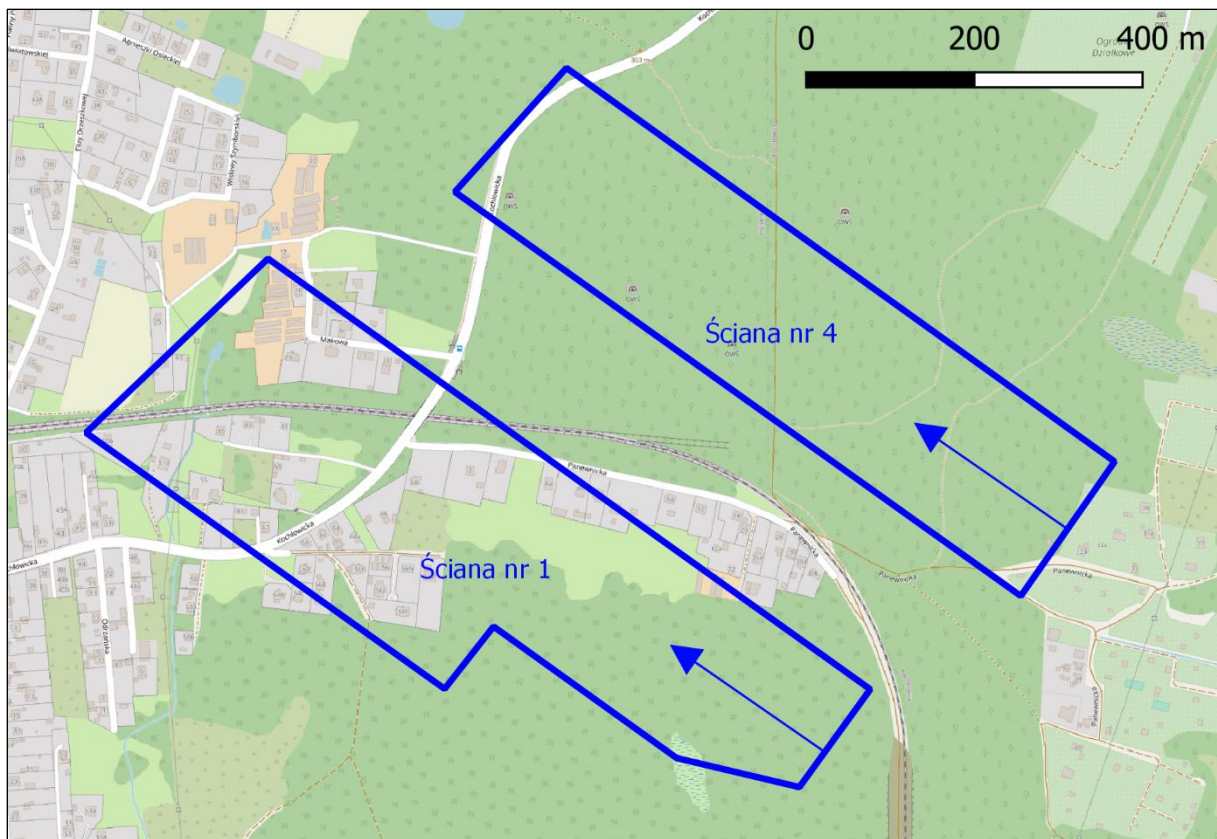


**Rys. 4.16.** Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. 1-go Maja w Rudzie Śląskiej w dzielnicy Wirek, w okresie 12.01.2018 – 09.03.2021 spowodowane eksploatacją górnictwem pokładu 414/2 (opracowanie własne).

#### 4.1.4.7. KWK Ruda Ruch Halemba, dzielnica Halemba w Rudzie Śląskiej

Eksploatacja pod dzielnicą Halemba w Rudzie Śląskiej realizowana jest od 1962 roku. Obecnie obserwowane deformacje są wynikiem współczesnej eksploatacji prowadzonej w latach 2005 – 2021. Węgiel wydobywany był 10 ścianami w 4 pokładach nr 410/2, 411, 414,1 502, przy czym pokład 502 wybierano na dwie warstwy: górną i dolną. W pracy wykorzystano dane dotyczące eksploatacji ścian nr 1 i 4 w pokładzie 414/1 (rys. 4.17). Zlokalizowane były na głębokości około 680 m, a ich miąższość wynosiła średnio około 3,2 m. Eksploatacja ściany 1 trwała od marca 2018 do kwietnia 2019 roku, a ściany 4 od czerwca 2020 do kwietnia 2021 roku. Pokłady nachylone są około  $6^\circ$  w kierunku SW. Przykład ten zostanie wykorzystany do określenia zasięgu deformacji górniczych w GZW przy zastosowaniu InSAR.

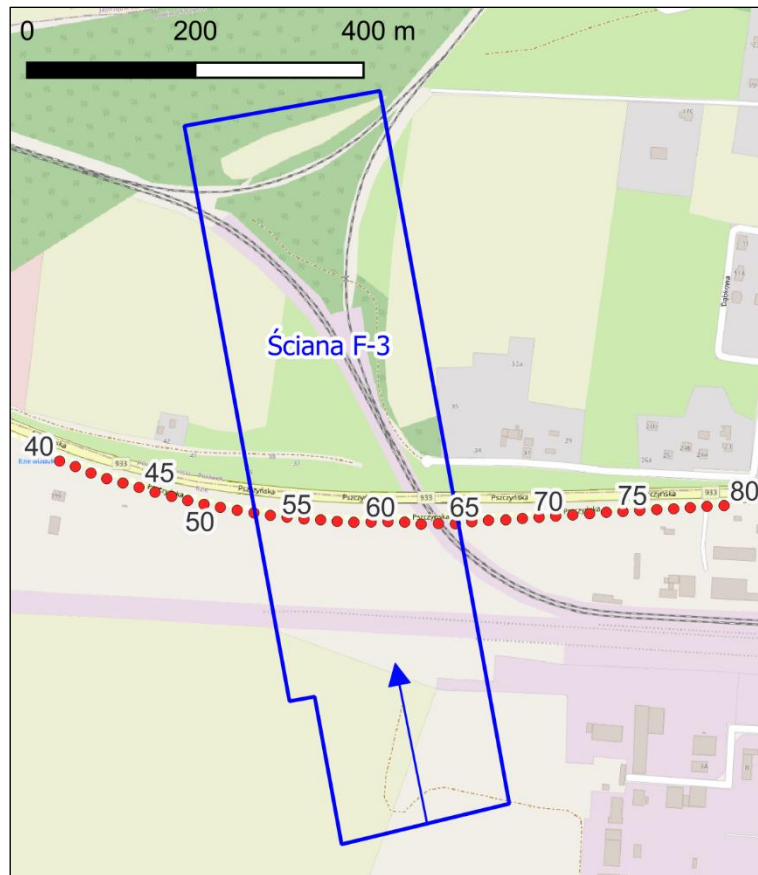




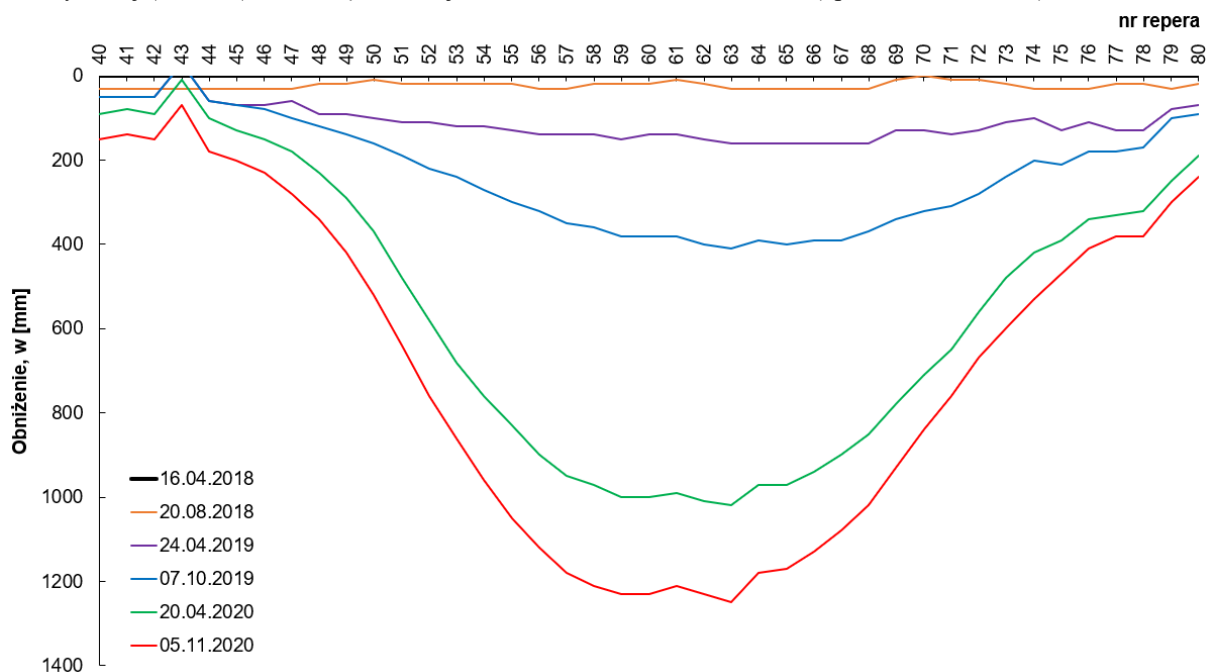
**Rys. 4.17.** Lokalizacja ścian eksploatacyjnych nr 1 i 4 w pokładzie 414/1 w Rudzie Śląskiej w dzielnicy Halemba – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).

#### 4.1.4.8. KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka, Jastrzębie Zdrój, rejon ul. Pszczyńskiej (DW933)

Z obszaru górniczego kopalni „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka wykorzystano dane dotyczące ściany F-3 eksploatowanej z pokładu 406/1. Ściana zlokalizowana była na głębokości około 830 m, a jej miąższość wynosiła średnio 1,6 m. Pokład nachylony był około 3° w kierunku NE. Eksploatację ściany powadzono w okresie od kwietnia 2018 do listopada 2020 roku. W pracy wykorzystano pomiary wykonywane w okresie od kwietnia 2018 do listopada 2018 roku, a więc w czasie eksploatacji ściany F-3. Punkty pomiarowe na mierzonej linii umieszczone były wzdłuż ul. Pszczyńskiej w Jastrzębiu Zdroju (rys. 4.18). Największe zmierzone obniżenie miało miejsce na punkcie nr 63 i wyniosło 1250 mm (rys. 4.19).



**Rys. 4.18.** Lokalizacja ściany F-3 pokładu 406/1 wraz z przebiegiem linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ulicy Pszczyńskiej (DW933) w Jastrzębiu Zdroju – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).

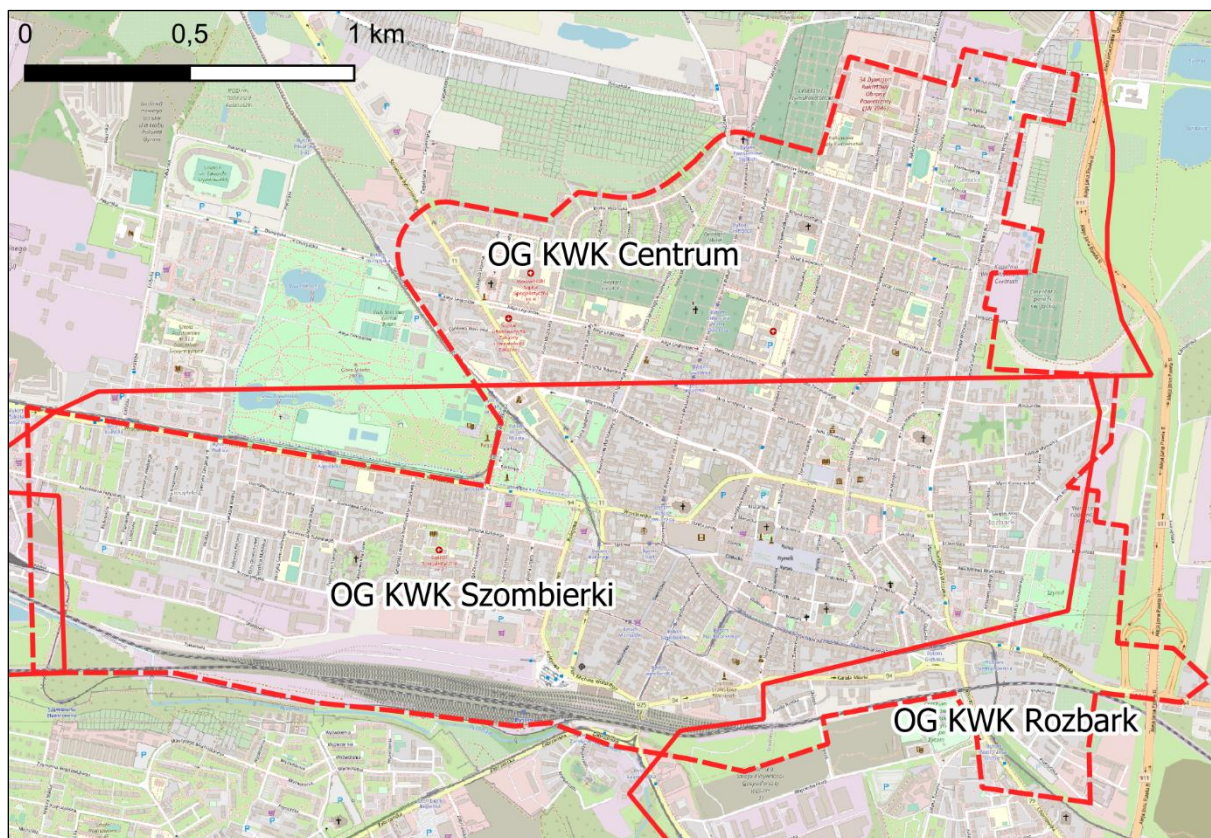


**Rys. 4.19.** Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. Pszczyńskiej w Jastrzębiu Zdroju, w okresie 16.04.2018 – 05.11.2020 spowodowane eksploatacją górnictwem pokładu ściany F-3 w pokładzie 406/1 (opracowanie własne).

## 4.2. Filary ochronny Śródmieścia Bytomia

### 4.2.1. Informacje ogólne

Miasto Bytom położone jest w północnej części GZW i jest częścią Górnośląsko – Zagłębiowskiej Metropolii (GZM). Powstało w 1254 roku, a początki górnictwa węgla kamiennego w Bytomiu sięgają XIX w. (Klabis, Kowalski 2015). Filary ochronny śródmieścia Bytomia ustanowiono w 1949 r. Obejmował on część obszarów górniczych kopalń Centrum (dawniej Dymitrow), Szombierki oraz nieznacznie Rozbark (rys. 4.20).



**Rys. 4.20.** Granica filara ochronnego śródmieścia Bytomia (linia przerywana) wraz z granicami obszarów górniczych kopalń - układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne na podstawie Kowalski 2015).

Podstawą podjęcia eksploatacji węgla kamiennego pod śródmieściem Bytomia była ekspertyza Budryka i Knothego (1977), a podstawowe założenia eksploatacji były następujące:

- stosowanie szczelnej podsadzki – utrzymanie współczynnika eksploatacji na poziomie  $a = 0,12$ ,
- deformacje powierzchni nie przekraczające II kategorii terenu górniczego,
- dopuszczalne wartości odkształceń poziomych do  $\pm 3$  mm/m,
- równomierna eksploatacja w rejonie granicy obszarów górniczych kopalń Szombierki i Centrum.

Eksplorację węgla kamiennego rozpoczęto w 1949 r. W 1993 zlikwidowano kopalnię Szombierki i utworzono (poprzez połączenie) kopalnię Centrum – Szombierki. Z kolei w 1999 r. wydzielono ZG Centrum, w którym kontynuowano eksploatację w filarze ochronnym do jej zakończenia 28.04.2015 r. (rys. 4.21), następnie przekazano kopalnię do Spółki Restrukturyzacji Kopalń (SRK) (Kowalski 2020).



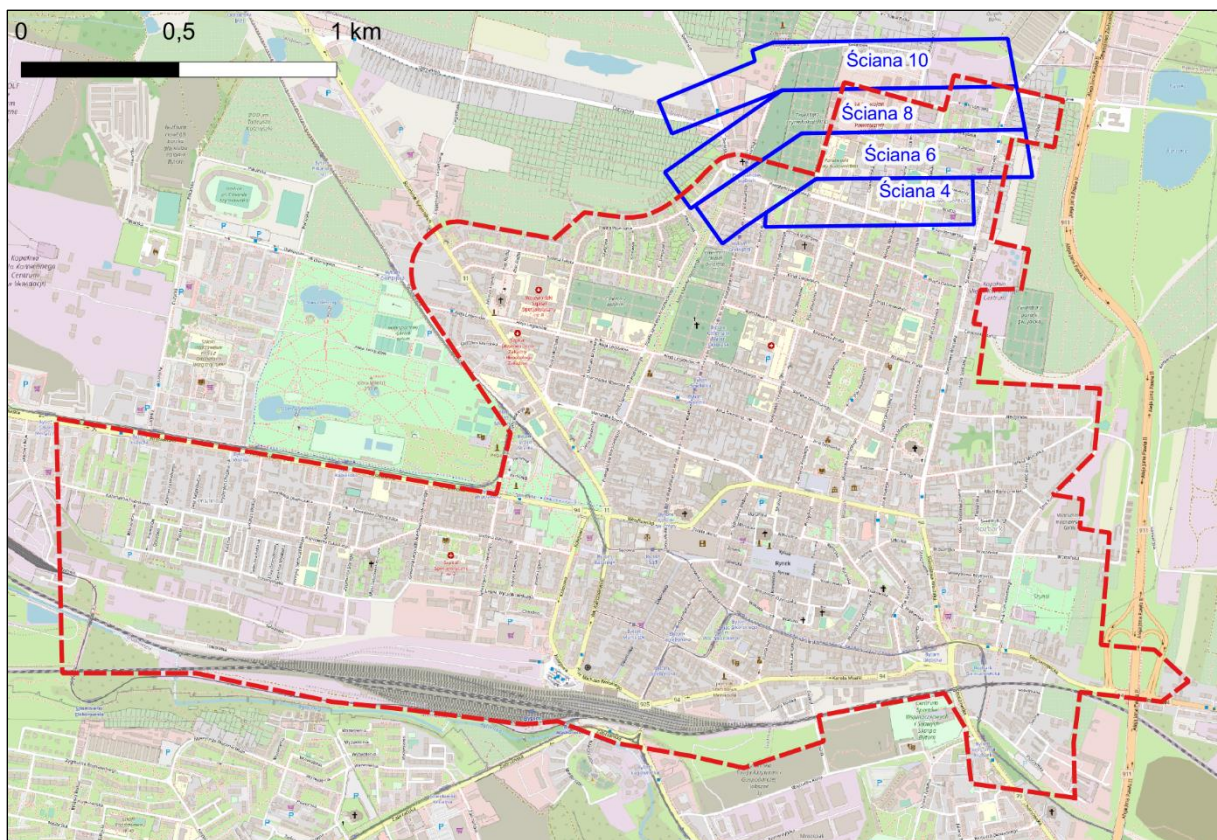
**Rys. 4.21.** Ostatnia tona węgla wydobyta z rejonu filara ochronnego śródmieścia Bytomia przez KWK Centrum (źródło własne).

#### 4.2.2. *Zarys warunków geologicznych i górniczych*

Złoże węgla kamiennego w filarze ochronnym zalega w postaci niecki geologicznej N-S, której dno znajduje się na granicy obszarów górniczych kopalń Szombierki i Centrum. Karbon stanowi kompleks iłowcowo-mułowcowo-piaskowcowy z 22 pokładami węgla kamiennego z których prawie połowa była eksploatowana. Pokłady węgla kamiennego zalegają na głębokości od około 100 m na wychodniach karbonu do 1000 m. Nad niecką geologiczną w pokładach węgla kamiennego zalegają cienka warstwa czwartorzędu i warstwy triasu - dolomity kruszconośne o miąższości do 100 m, w których eksploatowano złoża cynku i ołowiu, a także srebra.

Kopalnia Szombierki eksploatowała w południowej części filara ochronnego (na południe od ul. Wrocławskiej) w 9 pokładach (12 warstwach). Sumaryczna miąższość wybranego złoża przez kopalnię Szombierki głównie z podsadzką hydrauliczną wyniosła około 33 m. W północnej oraz centralnej części filara (na północ od ul. Wrocławskiej), kopalnia

Centrum eksploatowała 8 pokładów (na 9 warstw). Od 1961 r. wybrano kolejno pokład 417, 418, 419, 501/1, 507w.g., 507w.d., 504, 414/1 oraz 510. Sumaryczna miąższość wyeksploatowanego złoża węgla kamiennego wyniosła około 25 m. Eksploatację w filarze ochronnym prowadzono systemem z podsadzką hydrauliczną, za wyjątkiem pokładu 507 oraz 510, gdzie zastosowano również system z zawalem stropu. Łączne wydobycie w rejonie chronionym wyniosło około 102 mln Mg. Jako ostatni eksploatowany był pokład 510 w warstwie dolnej z podsadzką hydrauliczną w północnej części filara ochronnego 4 ścianami (ściana nr 10, 8, 6 oraz 4). Średnia wysokość warstwy wynosiła 2,4 m. Głębokość ostatniej eksploatowanej ściany 4 wynosiła 650 m (rys. 4.22) (Klabis i Kowalski 2015).



**Rys. 4.22.** Lokalizacja ostatniej eksploatacji w pokładzie 510 wd. (niebieskie kontury) prowadzonej przez KWK Centrum w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia (linia czerwona przerywana) – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne na podstawie Kowalski 2020).

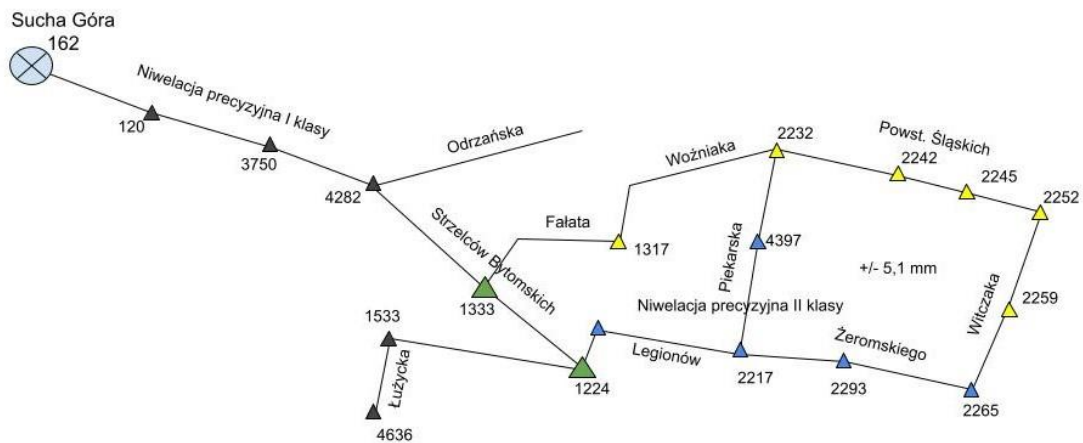
#### 4.2.3. Odwadnianie górotworu

W granicach filara ochronnego śródmieścia Bytomia i jego otoczeniu, z uwagi na bezpieczeństwo eksploatujących w sąsiedztwie kopalń a także ochronę powierzchni przed zawodnieniem od lat prowadzi się odwadnianie górotworu. Obecnie odwadnianie odbywa się za pomocą 3 pompowni stacjonarnych: Centralną Pompownię Bolko (dla górnictwa kruszcowego), Pompownię Stacjonarną Szombierki i Pompownię KWK Centrum, w której

planowana jest docelowo budowa systemu odwadniania Centralnej Pompowni Stacjonarnej Centrum (CPSC) dla wschodniego skrzydła niecki bytomskiej. Pompownia Bolko odprowadza wody ze zrobów porudnych na poziomie 124,9 m. Pompownia Stacjonarna Szombierki po zakończeniu eksploatacji węgla utrzymuje bezpieczny dla sąsiednich węglowych zakładów górniczych poziom wód na rzędnej -464,0 m n.p.m. Planowane jest jej wyłączenie po zmodernizowaniu systemu odwadniania kopalni Centrum, oraz przekierowanie wód do CPSC. System CPSC będzie składał się z dwóch pompowni głównych zlokalizowanych na poziomach 250 m i 774 m oraz pompowni pomocniczej znajdującej się poniżej poziomu 774 m w szybie Budryk. System będzie utrzymywał bezpieczny poziom wód na rzędnej -585,0 m n.p.m. (głębokość około 850 m). Pompownia Bolko, jak i modernizowana CPSC, będą funkcjonowały do czasu kiedy będą czynne zakłady górnicze w zachodnim skrzydle niecki bytomskiej. W związku z tym, w najbliższym czasie nie nastąpi zatapianie górotworu wodami kopalnianymi. Wynika stąd, że warunki wodne w górotworze pod śródmieściem Bytomia nie miały i nie będą miały (w najbliższych kilku latach) wpływu na zmiany deformacji powierzchni.

#### *4.2.4. Deformacje powierzchni*

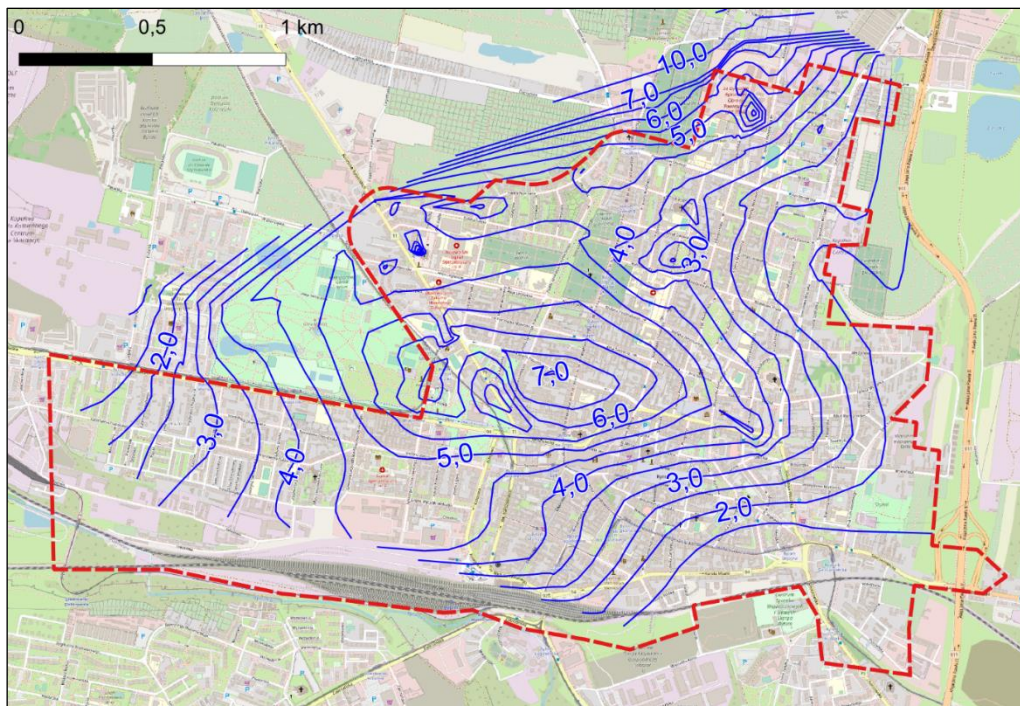
Na terenie chronionym dla śródmieścia Bytomia od 1949 r. dwa razy w roku wykonywane były pomiary wysokościowe oraz długości na liniach pomiarowych wzdłuż wybranych ulic. Głównym punktem nawiązania był reper nr 162 znajdujący się w Suchej Górze, z którego prowadzono niwelację precyzyjną I klasy do reperów węzłowych nr 1224 i 1333. Wysokość repera w Suchej Górze przyjmowano jako bezbłędną, ze względu na jego lokalizację poza wpływami eksploatacji górniczej. Pomiary wysokościowe były prowadzone jak niwelacja precyzyjna I i II klasy oraz niwelacja techniczna na sieci punktów pomiarowych ziemnych (linie pomiarowe) oraz ściennych. Błąd średni wysokości punktów nawiązania wynosił  $\pm 5,1$  mm ( $\pm 0,78$  mm/km), a po wyrównaniu  $\pm 8,8$  mm ( $\pm 0,64$  mm/km). W nawiązaniu do punktów osnowy precyzyjnej śródmieścia reperów nr 1224 i 1333 zlokalizowanych przy ul. Strzelców Bytomskich wykonywano niwelację techniczną. Suma błędów niwelacji prowadzonej w śródmieściu Bytomia wynosiła  $\pm 10,7$  mm (Kowalski 2020).



**Rys. 4.23.** Schemat osnowy pomiarowej w śródmieściu Bytomia nawiązanej do repera w Suchej Górze (opracowanie własne na podstawie Wagner 2019).

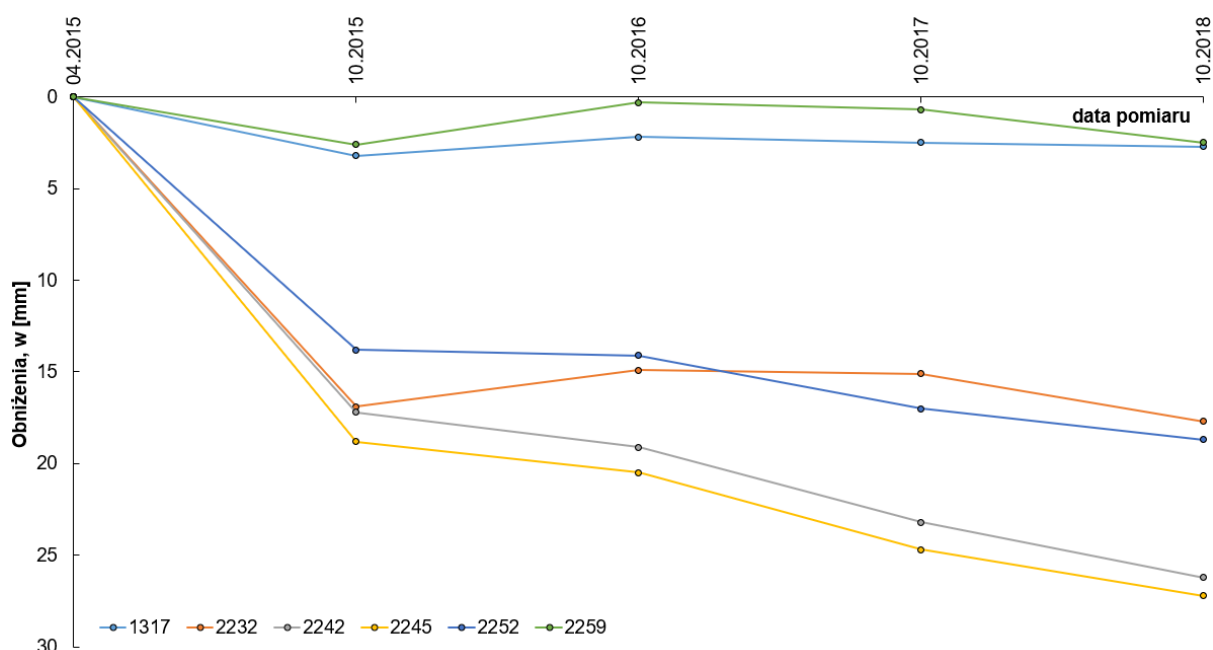
Wartości pomierzonych obniżen w latach 1949 – 2015 przedstawiono na rysunku 4.24. Pomiar z kwietnia 2015 r. był ostatnim dla terenu chronionego śródmieścia, wykonany w trakcie trwania eksploatacji. Największe obniżenia wystąpiły na ul. Piłsudskiego (między skrzyżowaniami z ul. Powstańców Warszawskich i z ul. Piekarską) i wyniosły około 7 m. Obniżenia dochodzące do 6,5 m zmierzono w północnej i zachodniej części filara ochronnego:

- na północ od skrzyżowania ulic Białego i Mickiewicza,
- w rejonie kościoła św. Krzyża przy ul. Ligonii,
- w rejonie Urzędu Miasta przy ul. Parkowej.



**Rys. 4.24.** Izolinie przedstawiające obniżenia [m] powstałe na skutek eksploatacji górniczej w latach 1949 – 04.2015 w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia – układ PL2000/6, EPSG: 2177 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).

Po zakończeniu eksploatacji przez 2,5 roku wykonywano pomiary na wybranych punktach *sieci osnowy precyzyjnej śródmieścia Bytomia* (nr 1317, 2232, 2242, 2245, 2252 i 2259) zlokalizowanych przy ul. Fałata, Powstańców Śląskich i Witczaka (w północnej części terenu chronionego – w rejonie ostatniej eksploatacji). Był to monitoring obniżeń zanikających po zakończeniu eksploatacji. W okresie 04.2015 – 10.2018 r. obniżenia kształtowały się w przedziale od 2 mm do 27 mm. Największy przyrost deformacji miał miejsce w pierwszych 6 miesiącach po zakończeniu eksploatacji (Wagner 2019). Przyrost deformacji zanikających przedstawiono na wykresie (rys. 4.25).



**Rys. 4.25.** Obniżenia powierzchni zmierzone po zakończeniu eksploatacji w filarze ochronnym śródmieścia Bytomia (opracowane na podstawie Kowalski 2020).

Obniżenia na poziomie kilku milimetrów w dalszym ciągu mogą ujawniać się w rejonie terenu chronionego śródmieścia Bytomia, przy czym będą to obniżenia rezydualne, wynikające ruchów górotworu do wybranych pustek i dna niecek obniżeniowych w obrębie terenu chronionego, jak i poza nim. (Kowalski 2020).

Rejon badawczy śródmieścia Bytomia, ze względu na zurbanizowanie terenu, był obszernie obserwowany czego wynikiem są wiarygodne wyniki pomiarów obniżeń, które będą przydatne do badania czasu zanikania deformacji po zakończeniu eksploatacji z wykorzystaniem interferometrii satelitarnej.



## 5. Charakterystyka zastosowanych metod badawczych oraz analiza otrzymanych wyników

### 5.1. Przetwarzanie zobrażeń SAR metodą SBAS

#### 5.1.1. Opis metody

Metoda SBAS została opracowana na początku XXI w. (Berardino i in. 2002; Lanari i in. 2004). W metodzie wykorzystywany jest stos zobrażeń SAR, z których tworzone są interferogramy. Kryterium doboru par interferometrycznych jest długość linii bazowej  $B_n$  i czasowej  $B_t$ . Linie bazowe nie mogą być dłuższe od tak zwanej długości krytycznej opisanej wzorem (5.1) (Bamler, Hartl 1998; Hanssen 2001):

$$B_{\perp c} = \frac{\lambda R \operatorname{tg}(\theta - \zeta)}{2} \quad (5.1)$$

gdzie:

- $B_{\perp c}$  – wartość krytyczna linii bazowej,
- $\lambda$  – długość fali,
- $R$  - odległość od satelity do mierzonego obiektu,
- $\theta$  – kąt padania wiązki fali,
- $\zeta$  – nachylenie terenu.

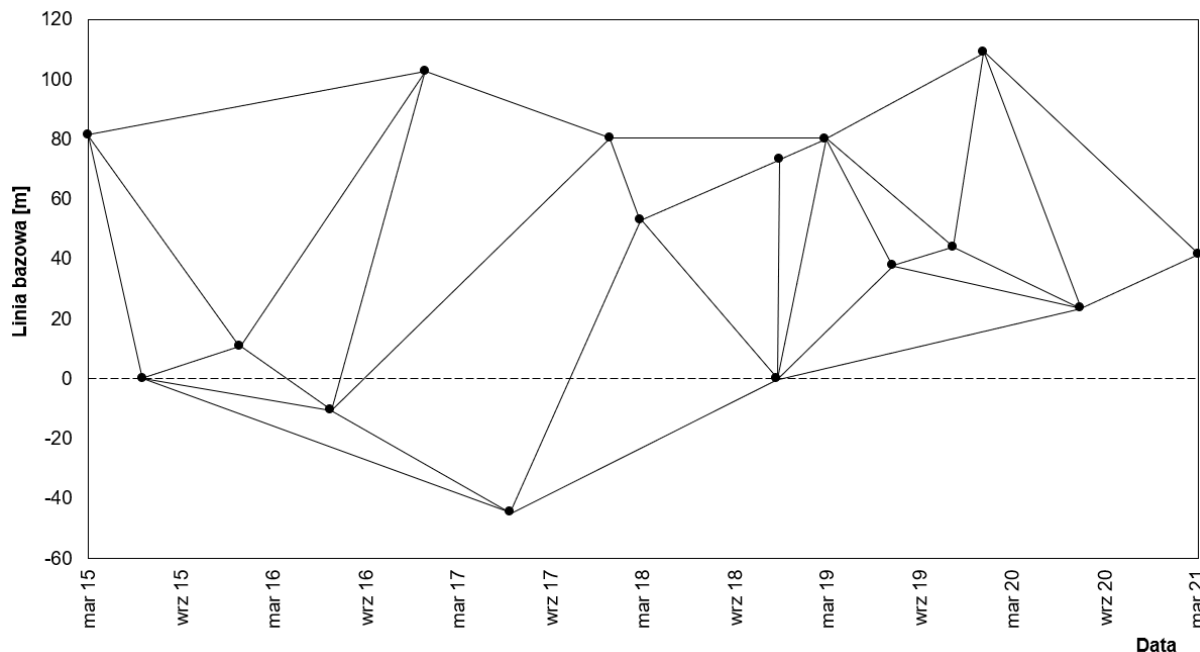
Podejście to pozwala uniknąć problemów związanych z dekorrelacją przestrzenną sygnału i osiągnięcie wyższej koherencji, niż w przypadku zwykłej metody różnicowej DInSAR. Różnica fazowa dwóch spójnych pikseli w kierunku zakresu  $r$  i azymutu  $A$  wyrażana jest według zależności (5.2) (Berardino i in. 2002):

$$\begin{aligned} \Delta\varphi(r, A) &= \varphi(t_B, r, A) - \varphi(t_A, r, A) \\ &\approx \frac{4\pi}{\lambda} [d(t_B, r, A) - d(t_A, r, A)] + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n \Delta z}{r \sin\theta} \\ &+ [\varphi_{\text{atm}}(t_B, r, A) - \varphi_{\text{atm}}(t_A, r, A)] + \Delta n, \quad \forall = 1, \dots, M \end{aligned} \quad (5.2)$$

gdzie:

- $\varphi(t_B, r, A), \varphi(t_A, r, A)$  – faza odpowiadająca dwóm zobrażeniom SAR wykonanym w czasie  $t_B$  oraz  $t_A$ ,
- $d(t_B, r, A), d(t_A, r, A)$  – skumulowane przemieszczenia w kierunku LOS,
- $\Delta z$  – błąd topografii terenu,
- $\varphi_{\text{atm}}(t_B, r, A), \varphi_{\text{atm}}(t_A, r, A)$  – składnik fazy atmosferycznej dwóch zobrażeń SAR wykonanych w czasie  $t_B$  oraz  $t_A$ ,
- $\Delta n$  – składnik szumów i dekorrelacji.

Ponieważ, zobrazowania SAR ze stosu łączone są w pary na zasadzie „każdy z każdym” ograniczonej o kryterium linii bazowej i czasowej, nie ma jednego zobrazowania wzorcowego. Jest wiele zobrazowań wzorcowych i wtórnych (dla każdego tworzonego interferogramu). W związku z tym schemat obrazujący połączenia par wygląda następująco (rys. 5.1):



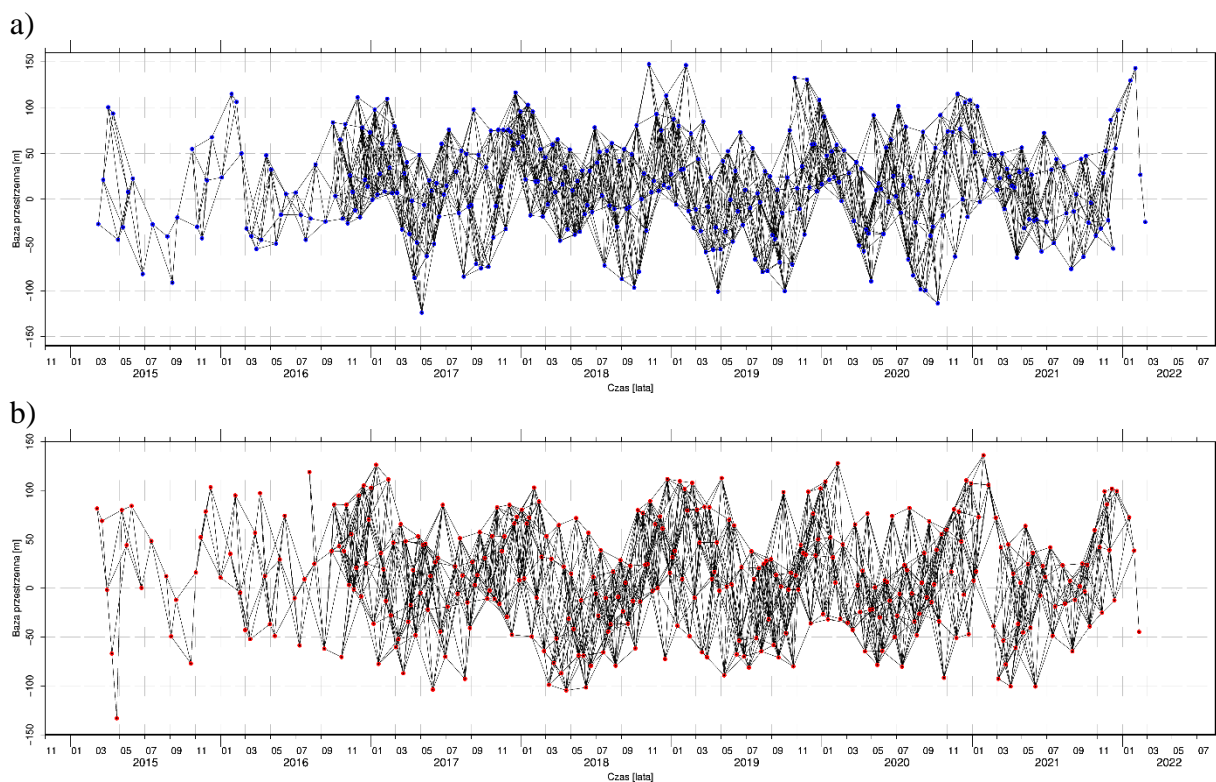
**Rys. 5.1.** Przykład połączeń par zobrazowań SAR w metodzie SBAS z uwagi na długość linii bazowej i czasowej; każdy punkt definiuje jedno zobrazowanie SAR, a linie symbolizują interferogramy (opracowanie własne).

W metodzie SBAS interferogramy przetwarzane są metodą rozkładu według wartości osobliwych (ang. *Singular Value Decomposition, SVD*) (Strang 1988; Golub, Van Loan 1996), co pozwala na inwersję fazy każdego interferogramu w stosunku do obrazu referencyjnego. Obliczenia wykonywane są dla rozpraszaczy równomiernie rozproszonych w przestrzeni (ang. *Distributed Scatterers, DS*), a wartości przemieszczeń w wygenerowanym szeregu czasowym odniesione są do pierwszego zobrazowania w zbiorze. Modyfikacją klasycznej metody SBAS jest podejście opracowane przez Schmidt’a i Burgmann’a (2003), w którym zamiast metody SVD, do przeprowadzenia inwersji, stosuje się metodę najmniejszych kwadratów.

### 5.1.2. Metodyka obliczeń przeprowadzonych metodą SBAS

Do obliczeń metodą SBAS wykorzystano dane SAR typu SLC (ang. *Single Look Complex*) pochodzące z konstelacji satelitów Sentinel-1A i Sentinel-1B należących do Europejskiej Agencji Kosmicznej. Zobrazowania są udostępniane w ramach programu Copernicus na licencji typu open-access. Obliczenia wykonano dla dwóch ścieżek przejścia satelity: wznoszącej i opadającej. Dla ścieżki wznoszącej nr 175 przetworzono 660 zobrazowań SAR (frame 156 – 165) wykonanych w okresie od 10.03.2015 do 25.02.2022. Jako kryterium

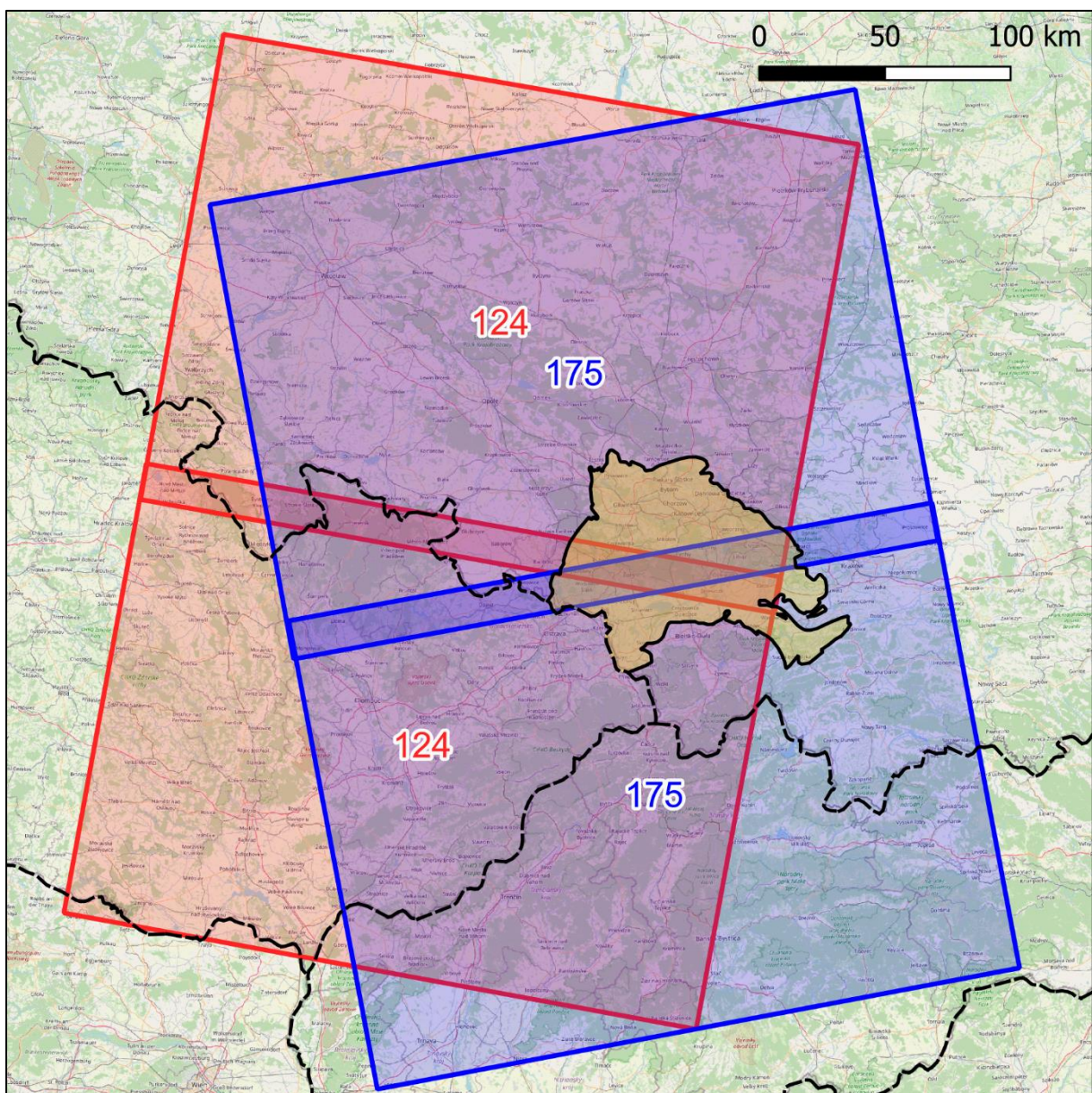
linii bazowej i czasowej przyjęto 100 m i 50 dni, co wynikało z serii obliczeń testowych. Przyjęte wartości, szczególnie dla bazy czasowej, są optymalne do obszaru badań (szerokość geograficzna). Istotnie mniejsze wartości bazy czasowej spowodowałyby brak ciągłości sieci, natomiast wydłużenie bazy czasowej mogłoby być przyczyną utworzenia interferogramów, które byłyby obarczone zbyt dużym szumem wynikającym między innymi z wegetacji roślin. W konsekwencji, przyjęte założenia, pozwoliły na obliczenie 1998 interferogramów. Dla ścieżki opadającej nr 124 przetworzono 642 zobrazenia SAR (frame 421 – 428) wykonanych w okresie od 07.03.2015 do 10.02.2022. Przyjęto takie samo kryterium linii bazowej i czasowej co w przypadku ścieżki nr 175. W rezultacie otrzymano 1937 interferogramów. Schemat rozkładu linii bazowej i czasowej dla każdej ścieżki przedstawiono na rysunku 5.2.



**Rys. 5.2.** Schemat rozkładu linii bazowej i czasowej dla ścieżki a) wznoszącej nr 175; b) opadającej nr 124 (opracowanie własne).

Kolejnym krokiem po utworzeniu interferogramów, było rozwinięcie fazy interferometrycznej w każdym z nich, w celu odtworzenia rzeczywistych wielkości faz. Do rozwinięcia fazy wykorzystano narzędzie SNAPHU (ang. *Statistical-cost Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping*), w którym zaimplementowano algorytm kosztu statystycznego i przepływu sieci dla rozpakowywania faz zaproponowany przez Chen'a i Zebker'a (2000, 2001, 2002). Rozwiniętą fazę poddano filtracji w celu oszacowania dwuliniowego wielomianowego trendu i dopasowania go do siatki oraz obliczenia i usunięcia niepasujących pozostałości. W tym celu

wykorzystano algorytm zaimplementowany do oprogramowania GMT (ang. *Generic Mapping Tools*) (Wessel i in. 2019). Z tak przygotowanych danych zostały wyznaczone ruchy powierzchni terenu w kierunku LOS dla każdej ścieżki przejścia satelity. Wszystkie obliczenia wykonano w oprogramowaniu GMTSAR (ang. *Generic Mapping Tools SAR*) (Sandwell i in. 2011), w którym zaimplementowana jest metoda przetwarzania obrazów satelitarnych – SBAS i które udostępniane jest na licencji typu open-access. Efektem przetwarzania były 2 zbiory 340 macierzy zawierających informację o skumulowanych, w 6-cio i 12-sto dniowych interwałach, przemieszczeniach w kierunku LOS dla obu ścieżek przejścia satelity, obejmujące swoim zasięgiem centralną część GZW (rys. 5.3).



**Rys. 5.3.** Lokalizacja GZW (czarna linia ciągła) względem wykorzystanych obrazów SAR ze ścieżki wznoszącej nr 175 (kolor niebieski) oraz opadającej nr 124 (kolor czerwony) oraz przebieg granic państwowych (czarna linia przerywana) – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).

Aby móc walidować otrzymane wyniki z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS w oparciu o klasyczne pomiary geodezyjne konieczne jest aby wszystkie przemieszczenia powierzchni były przedstawione w tym samym kierunku, w tym przypadku pionowym. Można to uzyskać poprzez przeprowadzenie dekompozycji wektora LOS na składową pionową, składową poziomą w kierunku wschód-zachód (E-W) oraz składową poziomą w kierunku północ-południe (N-S) - przypadek 3D. Niezbędne jest do tego jednak posiadanie danych pomiarowych z 3 niezależnych źródeł (Hanssen 2001; Fuhrmann, Garthwaite 2019). Pomijając składową poziomą w kierunku N-S i rozważając przypadek 2D do przeprowadzenia dekompozycji wystarczą dane z 2 niezależnych źródeł (w opisywanym przykładzie są to dwie ścieżki przejścia satelity nr 175 oraz 124). Zależność wektora LOS dla przypadku 2D wyrażana jest wzorem (5.3):

$$\begin{bmatrix} d_{asc} \\ d_{dsc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_{asc}\cos\alpha_{asc} & \cos\theta_{asc} \\ -\sin\theta_{dsc}\cos\alpha_{dsc} & \cos\theta_{dsc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_{EW} \\ d_V \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

gdzie:

$\theta$  – kąt padania wiązki, dla satelitów Sentinel-1 równy od  $0^\circ$  do  $45^\circ$ . Określony jest dla każdego piksela oddzielnie,

$\alpha$  – kąt pomiędzy orbitą po której porusza się satelita, a kierunkiem północy, dla satelity Sentinel 1 równy  $-15^\circ$  dla orbity wznoszącej i  $-165^\circ$  dla orbity opadającej.

Stosując zależność (5.3) otrzymano stos 340 macierzy zawierających informację o skumulowanych w 6-cio i 12-sto dniowych interwałach, pionowych przemieszczeniach powierzchni.

### 5.1.3. Analiza wyników otrzymanych z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS

Skumulowane przemieszczenia pionowe w okresie od 03.2015 do 02.2022 roku otrzymane z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS, przedstawiono w formie graficznej na załączniku nr 1. Na analizowanym obszarze można zaobserwować około 50 niecek obniżeniowych różnych rozmiarów. Wskazuje to, że na przestrzeni niespełna 7 lat w GZW prowadzone było co najmniej 50 ścian eksploatacyjnych, których wynikiem są wskazane ruchy powierzchni. Ze względu na lokalizację, niecki można podzielić na 4 główne grupy:

1. Rejon południowo – wschodni, okolice miast Jastrzębie Zdrój, Radlin, Rybnik.
2. Rejon wschodni, okolice miast Brzeszcze, Lędziny, Bieruń, Mysłówice.
3. Rejon środkowo – zachodni, okolice miast Knurów, Szczygłowice, Ruda Śląska.
4. Rejon północny, miasto Bytom.

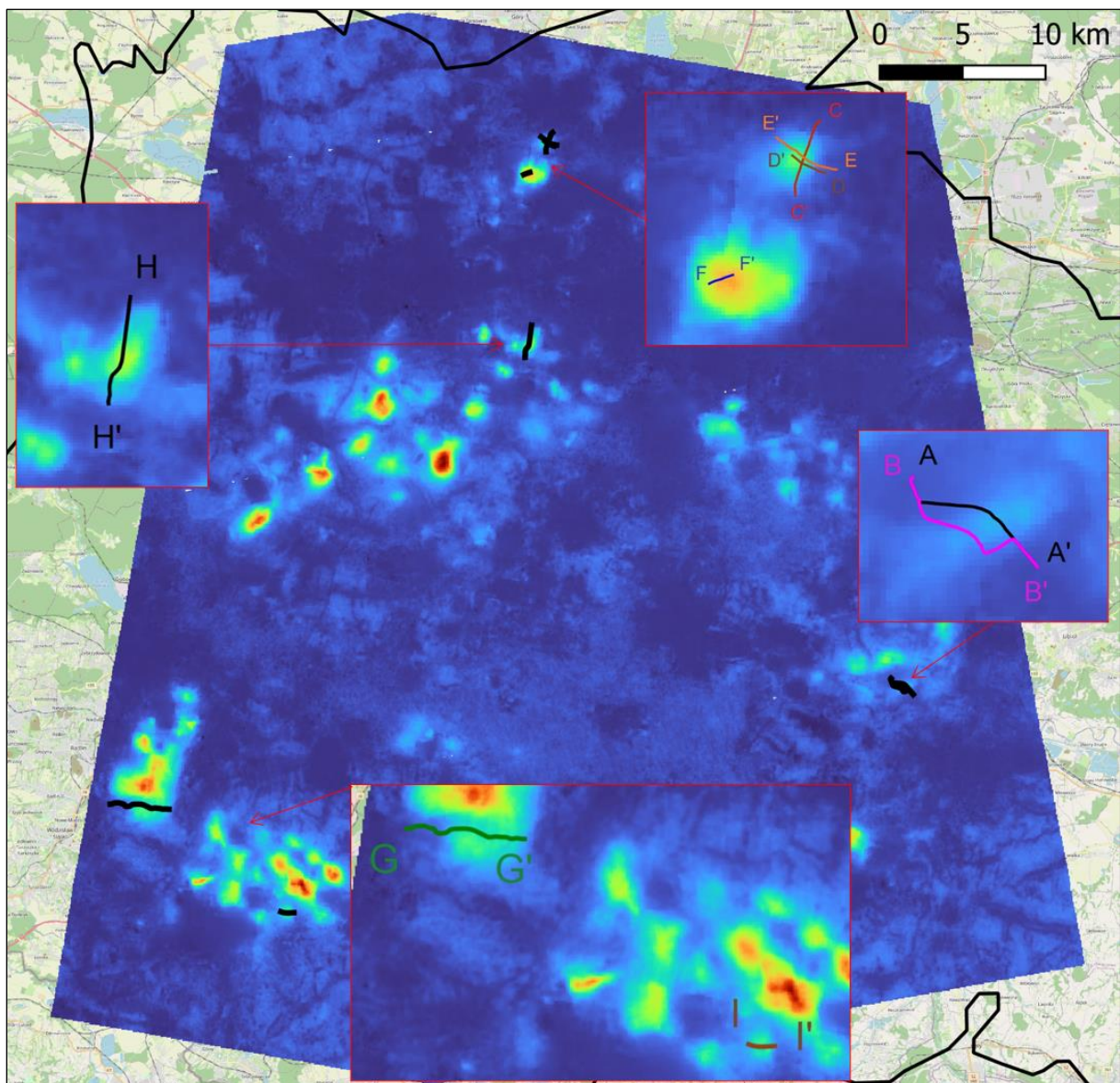
Największe obniżenie równe 1,8 m wystąpiło w dwóch nieckach obniżeniowych. Pierwsza z nich zlokalizowana jest w okolicy miejscowości Bujaków, Chudów i Borowa Wieś, a więc na terenie górniczym KWK Budryk. Rozpiętość niecki wyniosła 2 km w kierunku E-W i 3 km w kierunku N-S. Druga z nich zlokalizowana jest na terenie górniczym KWK Pniówek. Nie sposób natomiast określić jej rozpiętość gdyż, jak wynika z otrzymanych rezultatów, w tym rejonie nastąpiło prawdopodobnie połączenie się wpływów z różnych eksploatacji prowadzonych również przez sąsiednie zakłady KWK „Borynia – Zofiówka” oraz KWK Jastrzębie – Bzie. Można zatem stwierdzić, że obszar objęty wpływami eksploatacji ma rozpiętość około 12 km w kierunku E-W oraz około 7 km w kierunku N-S. Podobna sytuacja ma miejsce na zachód od opisywanego miejsca w okolicach KWK Row i miasta Rybnik. Rozpiętość obszaru objętego wpływami wynosi około 4,5 km w kierunku E-W oraz około 9 km w kierunku N-S. Bardzo dobrze pokazuje to skalę wpływu podziemnej eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu. Tylko w dwóch rejonach, na przestrzeni 7 lat, wpływami zostało objęte kilkanaście miejscowości i kilkaset tysięcy mieszkańców terenów górniczych GZW. W rejonie środkowo – wschodnim powstały również 3 znaczące niecki. Pierwsza z nich zlokalizowana jest na południe od miasta Gliwice, na południe od dzielnicy Sośnica. Obniżenie maksymalne przekracza 1,5 m, a rozpiętość wynosi około 2,5 km w kierunku N-S oraz około 3 km w kierunku E-W. Dwie kolejne mieszczą się w rejonie miast Knurów i Szczygłowice. Ich obniżenie maksymalne wynosi odpowiednio ponad 1,4 m oraz 1,5 m, a rozpiętość około 2,6 km i 2,1 km w kierunku N-S oraz około 2,4 km i 2,8 km w kierunku E-W. W bliskim sąsiedztwie powstało również kilka mniejszych niecek, których obniżenie było równe około 1 m. W rejonie wschodnim największe obniżenia zanotowano w okolicach miasta Brzeszcze oraz Chełm Śląski. Obniżenie maksymalne pierwszej niecki przekroczyło 1 m, a drugiej 0,9 m. Ich rozpiętość wynosi odpowiednio około 1,7 km i 3,2 km w kierunku N-S oraz około 1,8 km w kierunku E-W. Ponadto, w rejonie wschodnim powstało także kilka mniejszych niecek, których obniżenie maksymalne nie przekroczyło 0,8 m. W rejonie północnym ukształtowała się jedna znacząca niecka obniżeniowa w dzielnicy Miechowice w Bytomiu, oraz dwie mniejsze na północ od dzielnicy Miechowice i w mieście Piekary Śląskie. Obniżenie pierwszej z nich przekroczyło 1,2 m, a rozpiętość jest równa około 1,8 km w kierunku N-S oraz około 2,3 km w kierunku E-W. Obniżenia pozostałych dwóch niecek kształtowały się w okolicach 0,7 m.

#### *5.1.4. Walidacja wyników otrzymanych z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS*

Walidację wyników otrzymanych z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (załącznik 1) przeprowadzono w oparciu o wyniki pomiarów wykonywanych klasycznymi

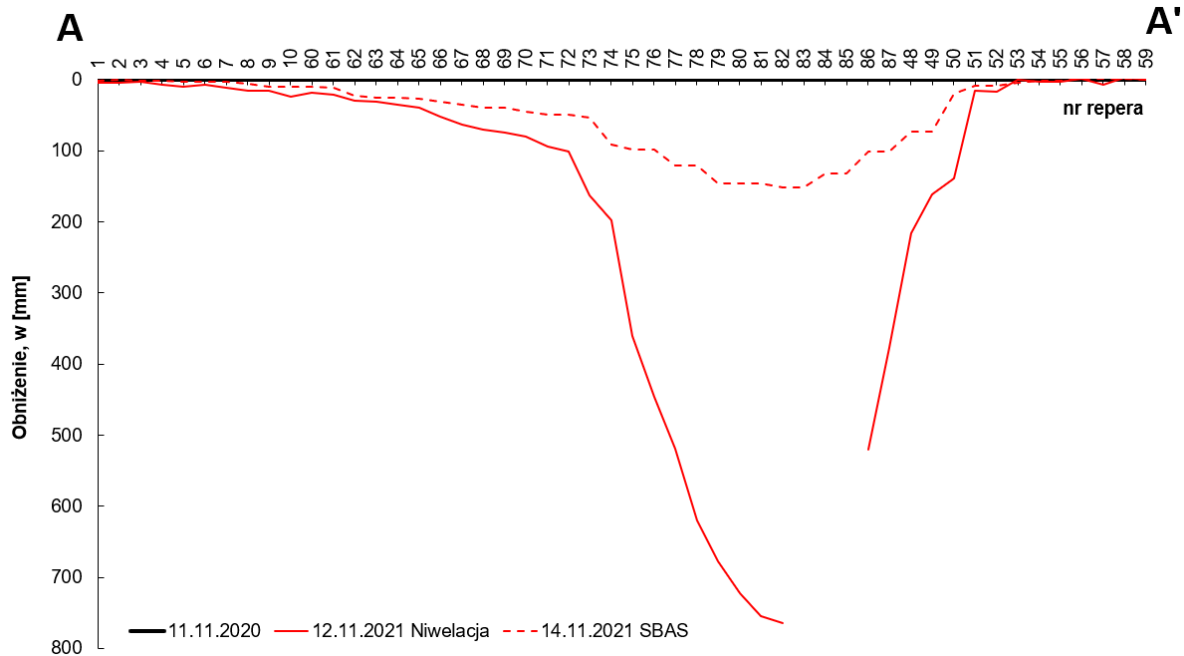
metodami geodezyjnymi, wzdłuż 9 linii pomiarowych, zlokalizowanych na terenie górniczym 6 kopalń (rys. 5.4):

1. KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast - profil A – A', B – B'.
2. KWK Bobrek – Piekary Ruch Bobrek - profil C – C'.
3. ZG EKO – PLUS Sp. z o. o. - profil D – D', E – E', F – F'.
4. KWK ROW Ruch Marcel - profil G – G'.
5. KWK Ruda Ruch Pokój (obecnie SRK Oddział KWK Pokój I – Pokój II) – profil H – H'.
6. KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka – profil I – I'.

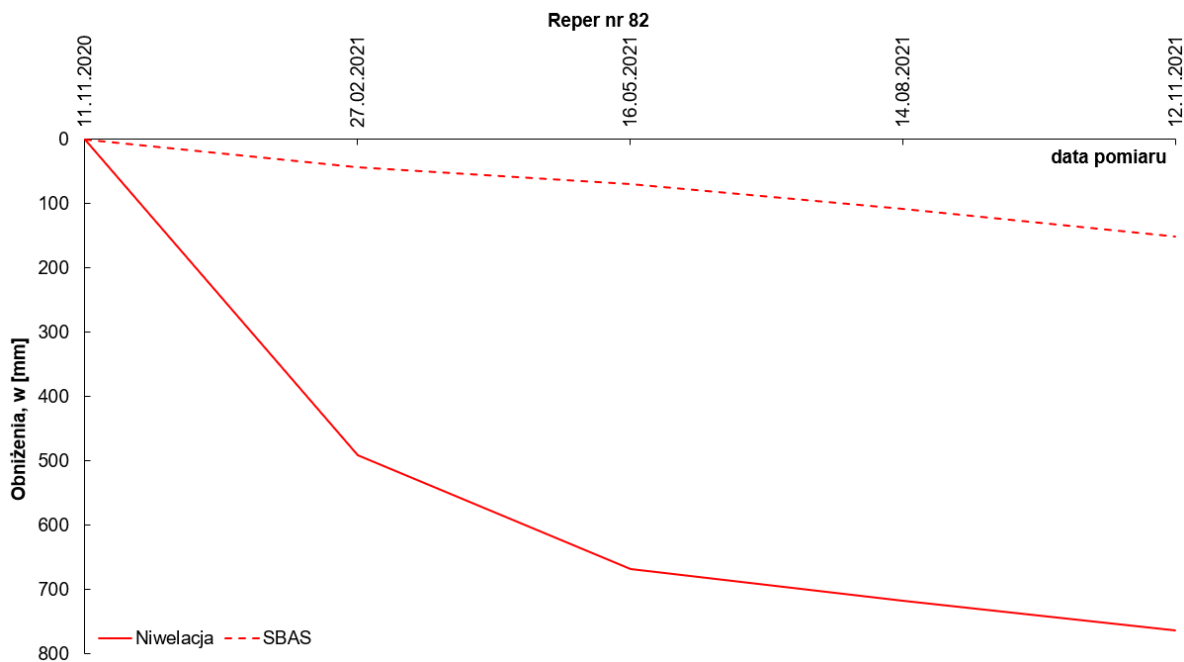


**Rys. 5.4.** Pionowe obniżenia powierzchni spowodowane eksploatacją górniczą w GZW w okresie 03.2015 – 02.2022 wyznaczone z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS wraz z lokalizacją linii pomiarowych wykorzystanych do walidacji wyników – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).

Aby porównać uzyskane wyniki sporządzono wykresy porównawcze dla wszystkich badanych przypadków wzdłuż 9 analizowanych linii pomiarowych jak również obniżenia pojedynczego repera w funkcji czasu, który na całej linii pomiarowej osiągnął największe obniżenie (rys. 5.5 – 5.22).

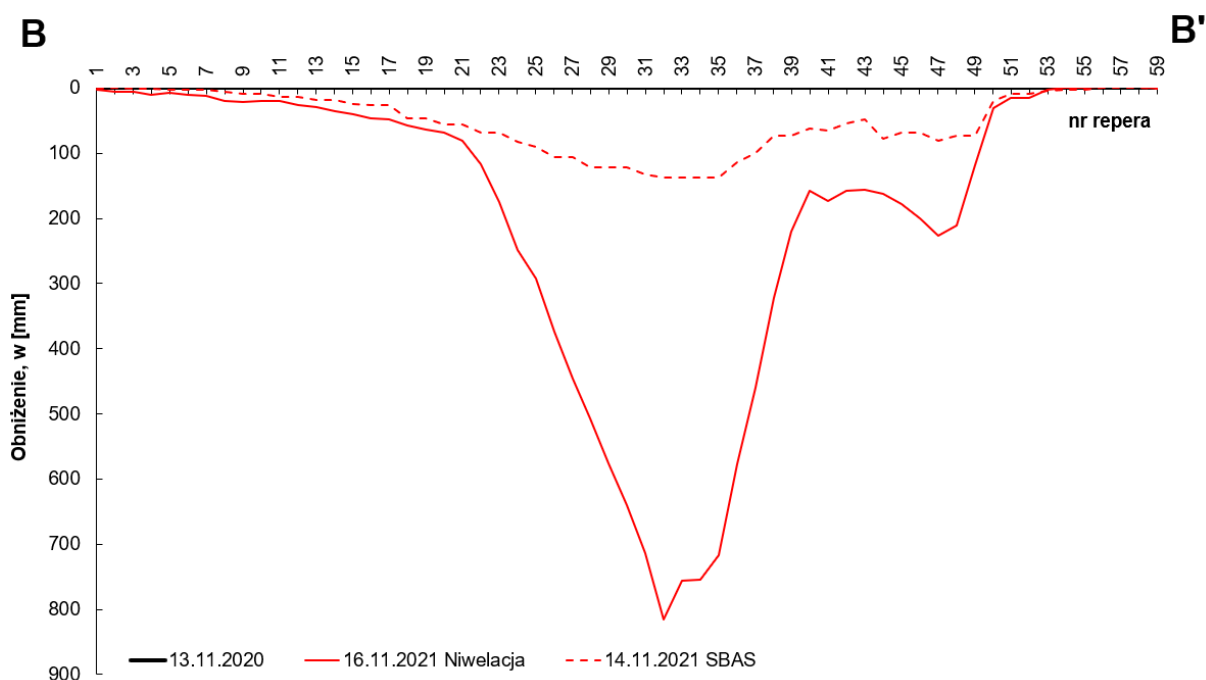


**Rys. 5.5.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu w terenie górniczym KWK Piast-Ziemowit Ruch Piast (opracowanie własne).

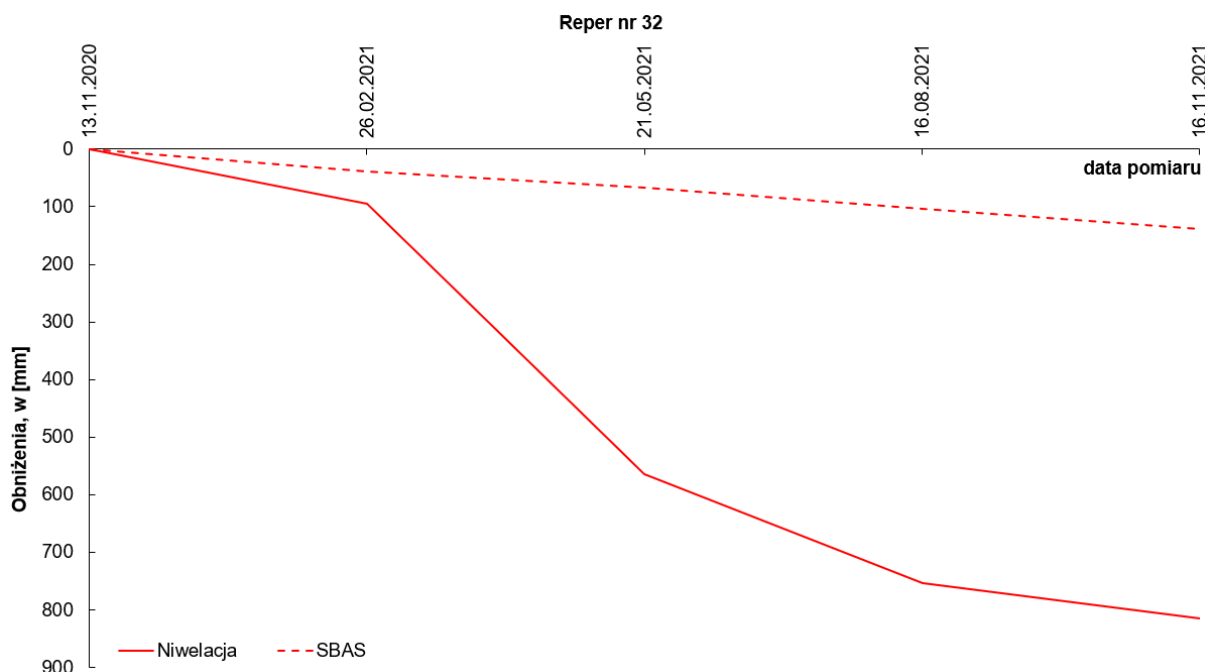


**Rys. 5.6.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 82 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu w terenie górniczym KWK Piast-Ziemowit Ruch Piast (opracowanie własne).

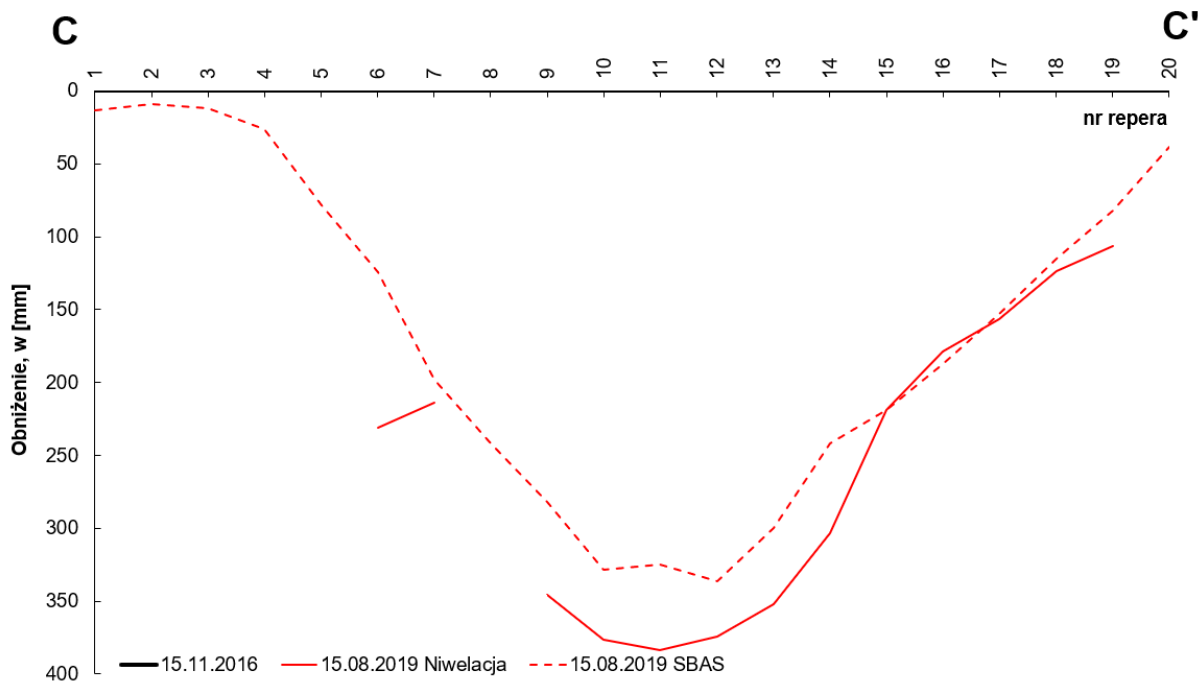




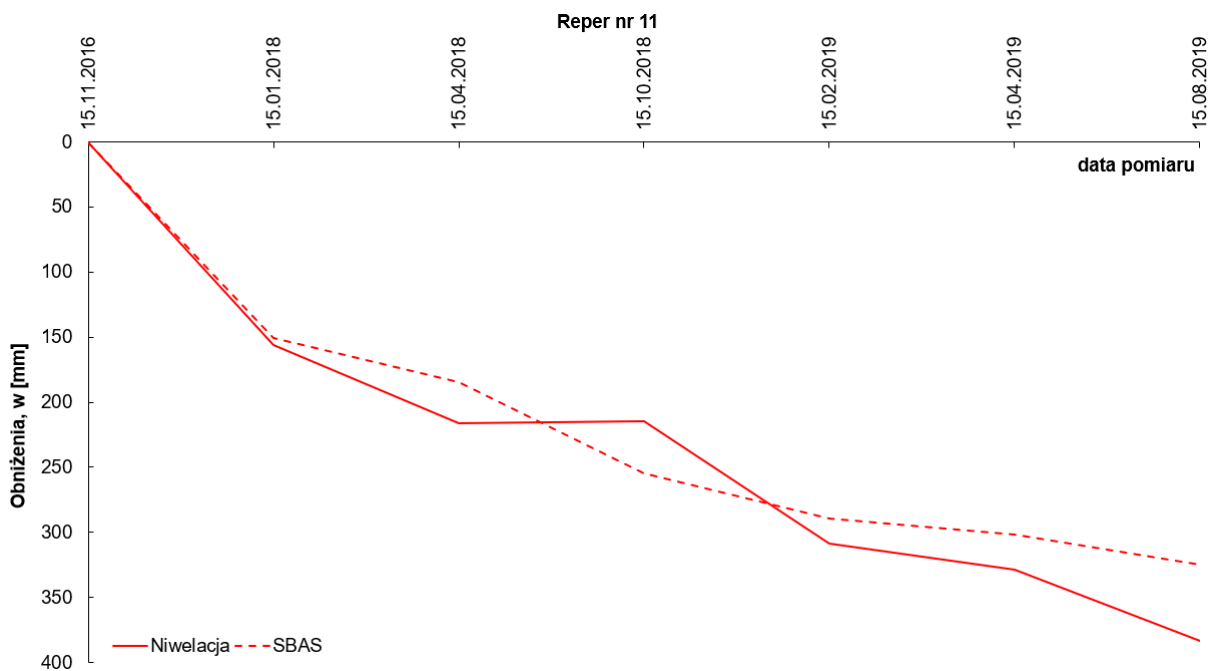
**Rys. 5.7.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Węglowej w Bieruniu w terenie górniczym KWK Piast-Ziemowit Ruch Piast (opracowanie własne).



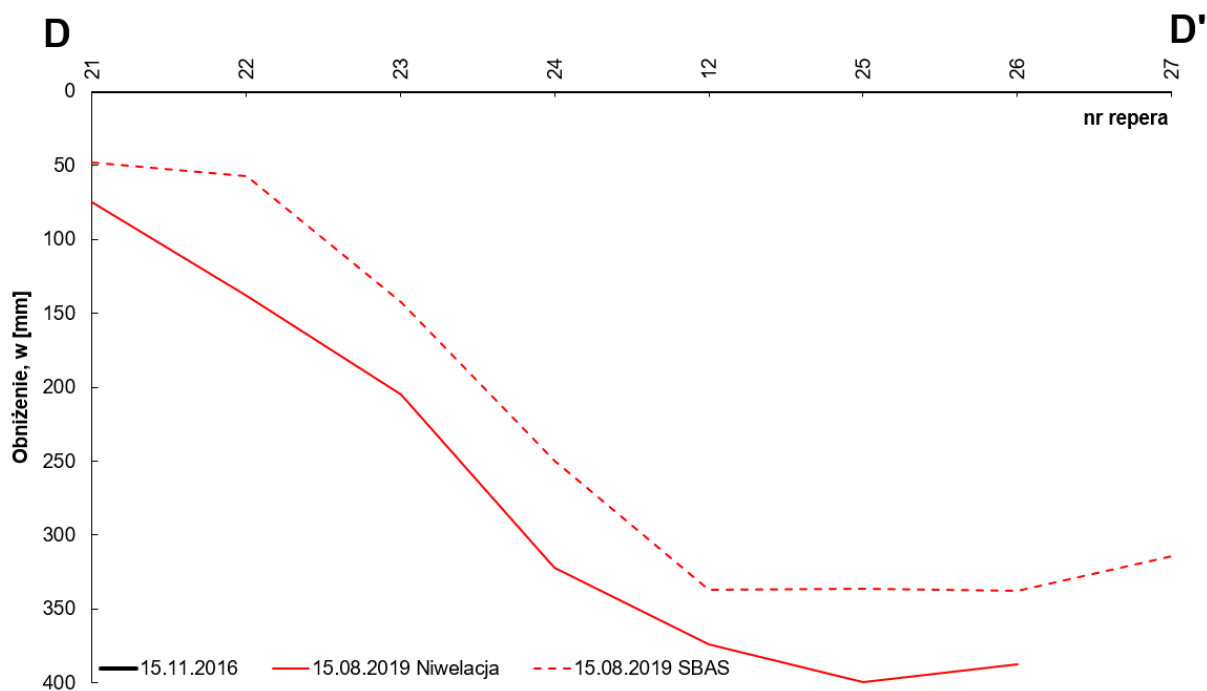
**Rys. 5.8.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 32 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Węglowej w Bieruniu w terenie górniczym KWK Piast-Ziemowit Ruch Piast (opracowanie własne).



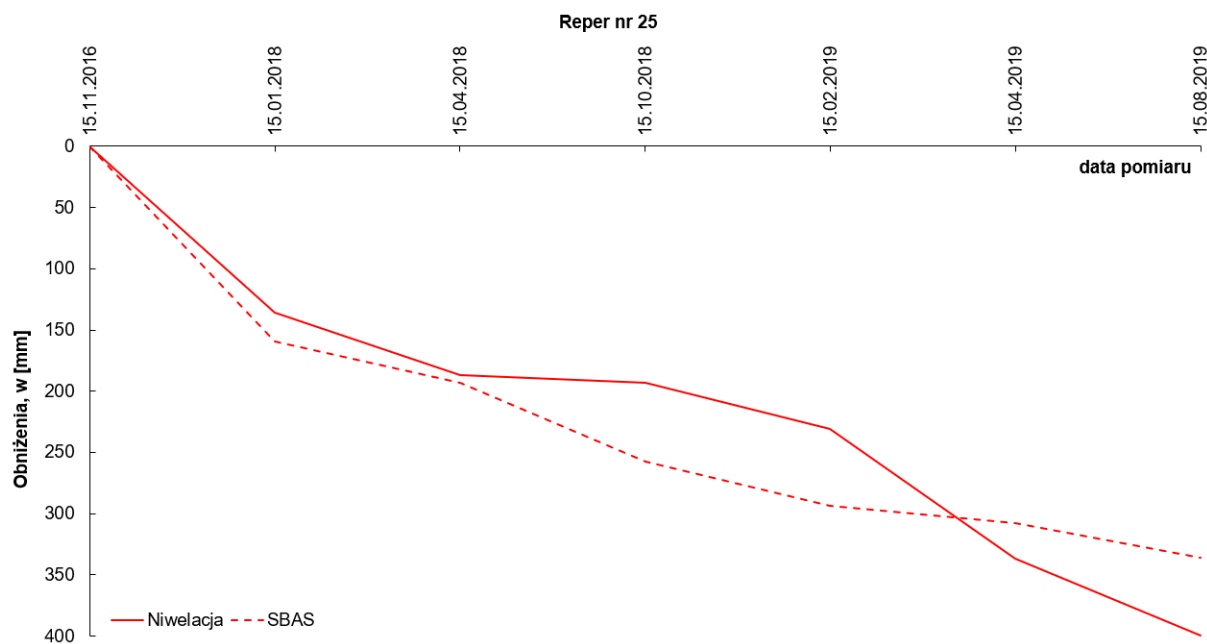
**Rys. 5.9.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Celnej w Bytomiu w terenie górniczym ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne).



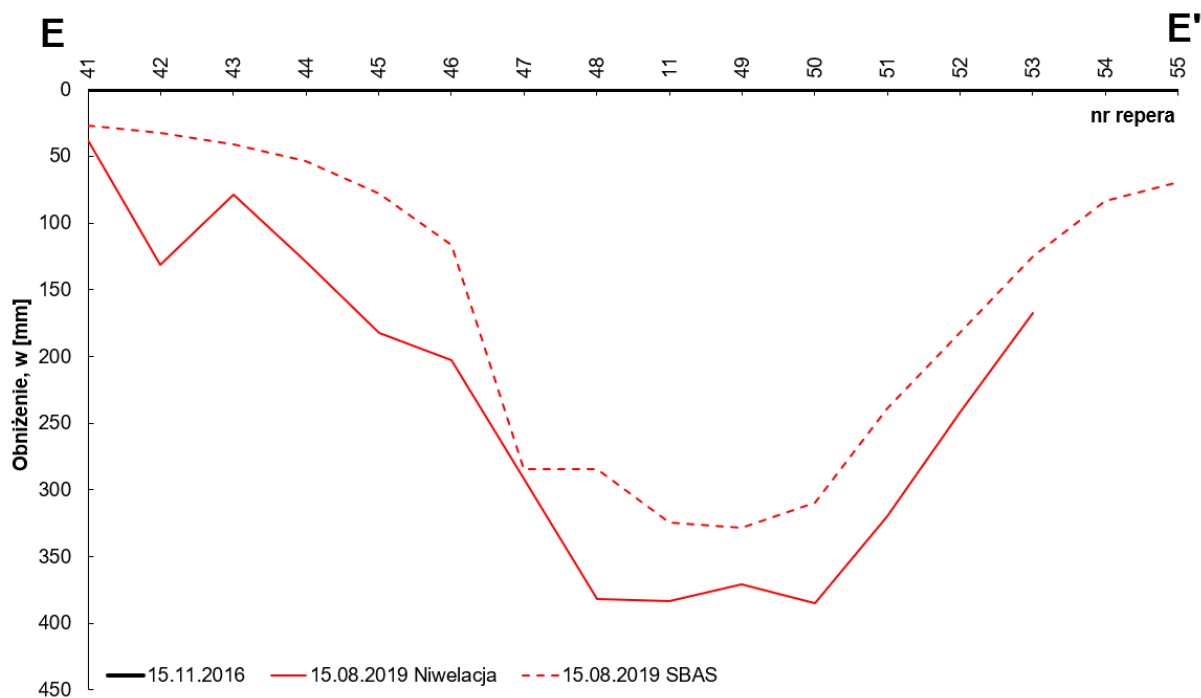
**Rys. 5.10.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 11 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Celnej w Bytomiu w terenie górniczym ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne).



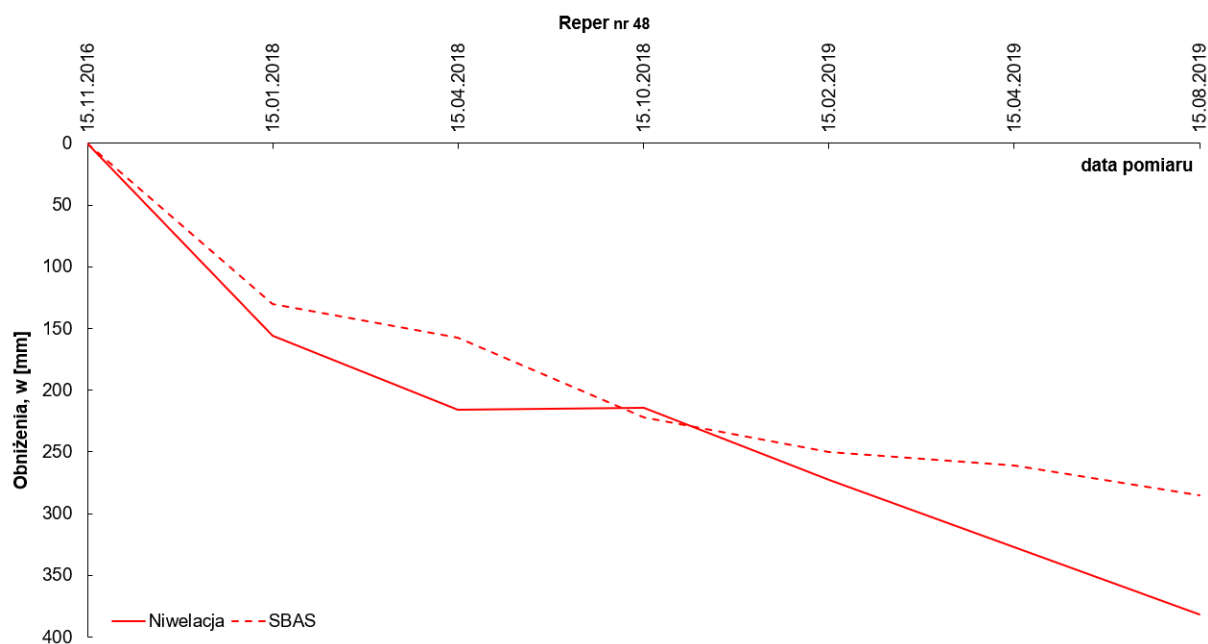
**Rys. 5.11.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż autostrady A1 w Bytomiu (strona południowa) w terenie górniczym ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne).



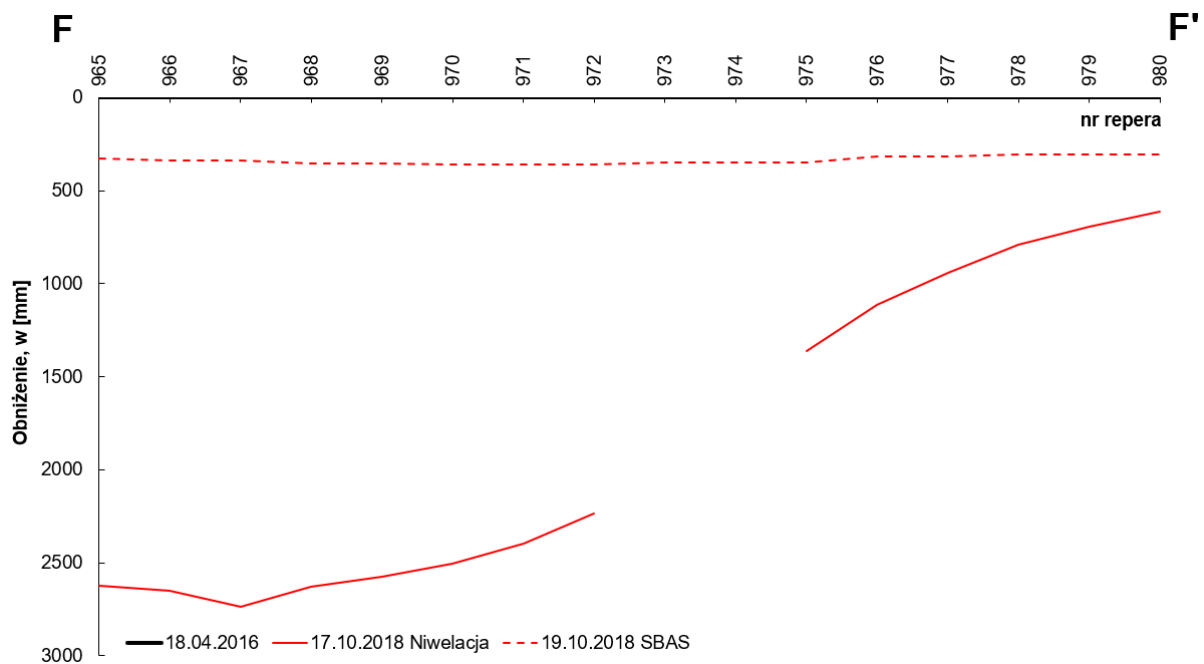
**Rys. 5.12.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 25 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż autostrady A1 w Bytomiu (strona południowa) w terenie górniczym ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne).



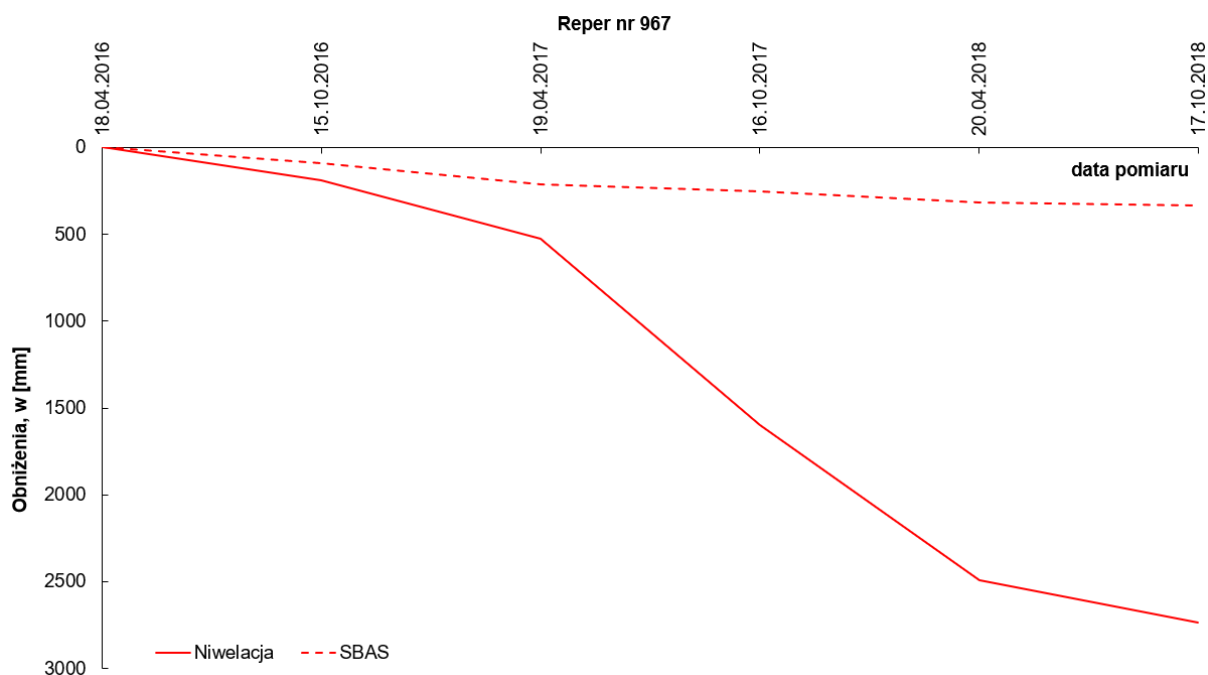
**Rys. 5.13.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż autostrady A1 w Bytomiu (strona północna) w terenie górniczym ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne).



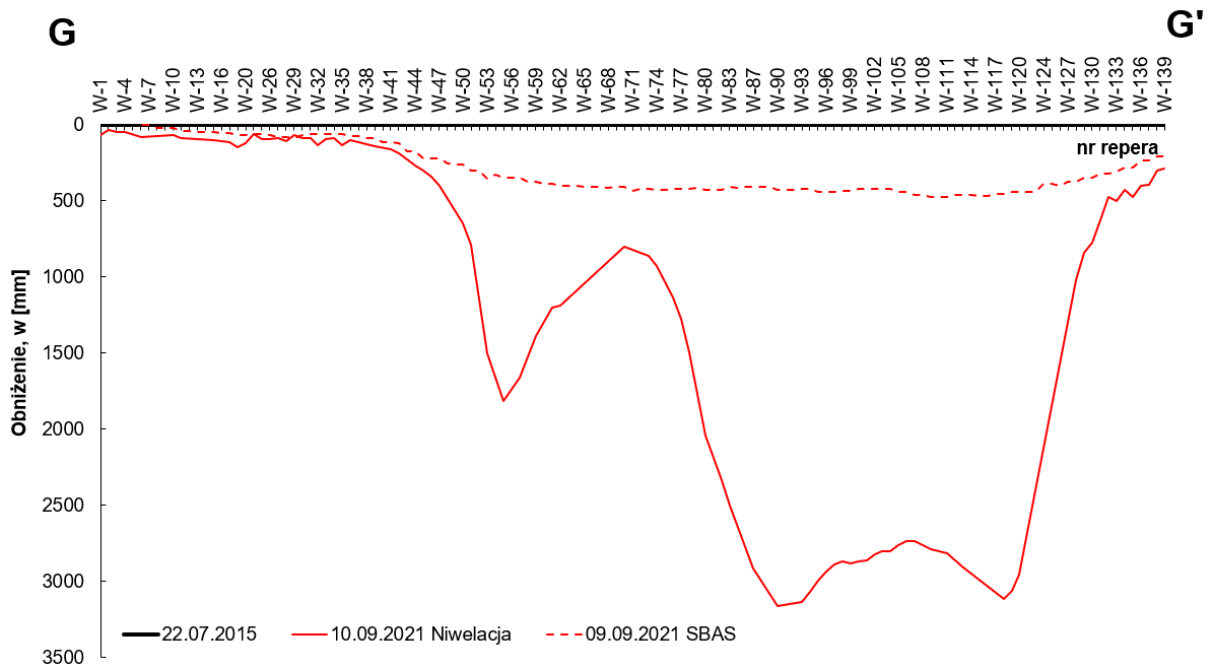
**Rys. 5.14.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 48 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż autostrady A1 w Bytomiu (strona północna) w terenie górniczym ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne).



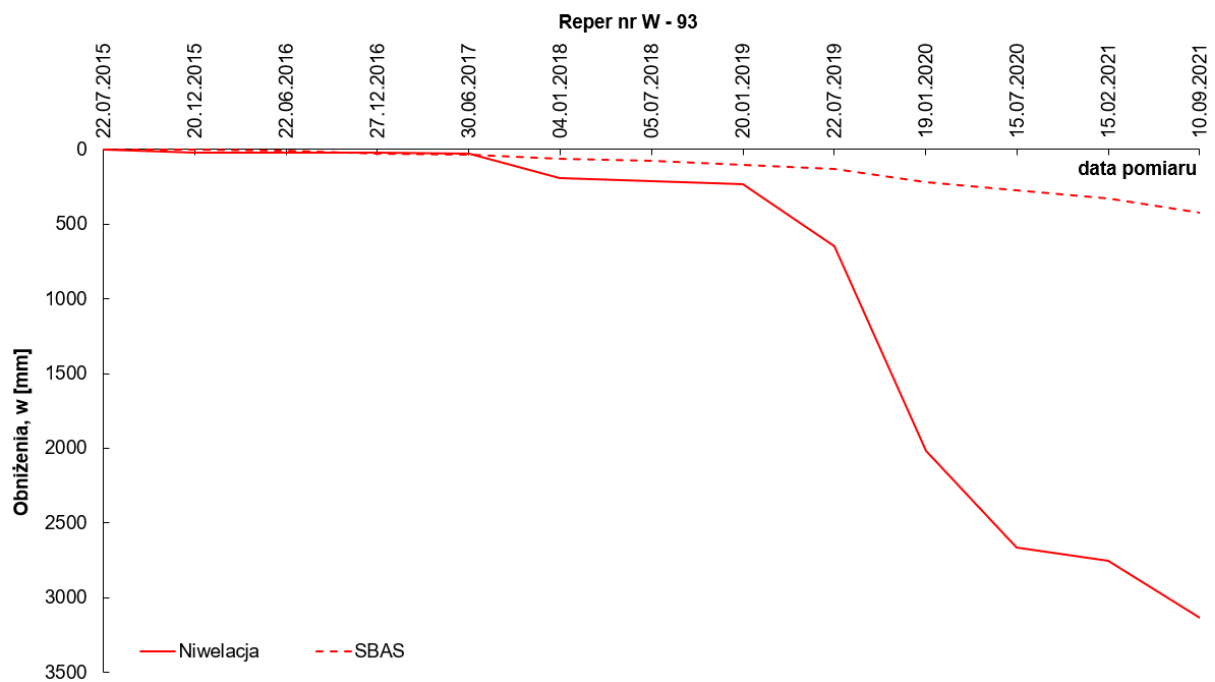
**Rys. 5.15.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Karbowskiej w Bytomiu w terenie górniczym KWK Bobrek-Piekary Ruch Bobrek (opracowanie własne).



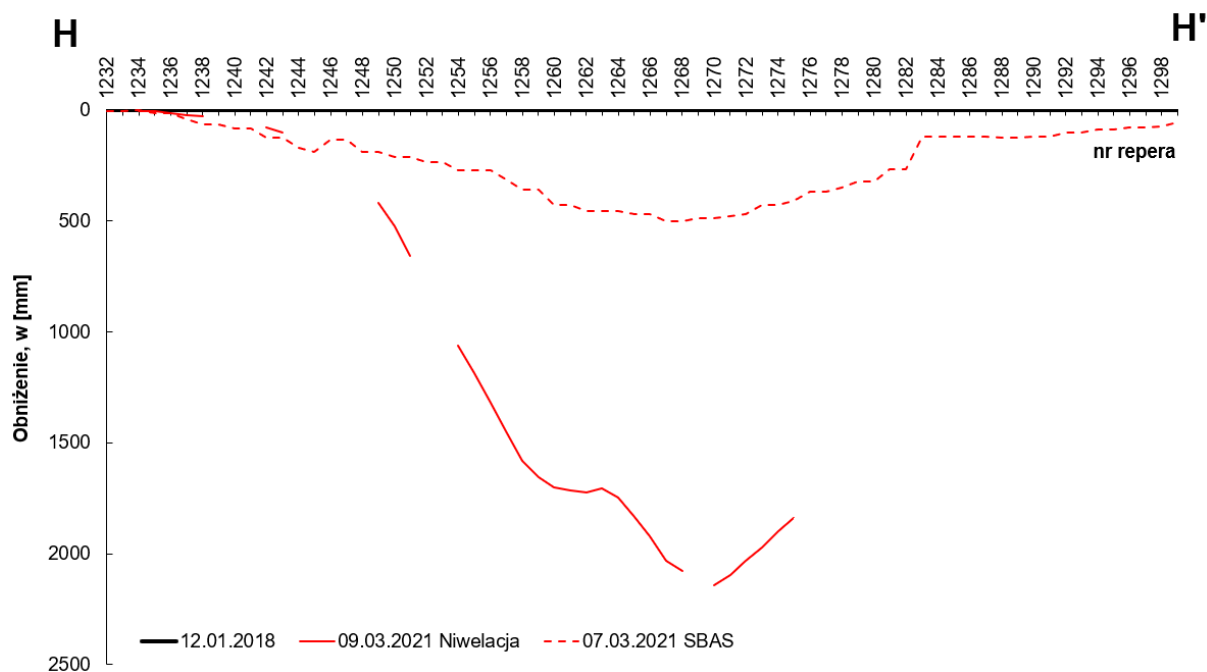
**Rys. 5.16.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 967 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Karbowskiej w Bytomiu w terenie górniczym KWK Bobrek-Piekary Ruch Bobrek (opracowanie własne).



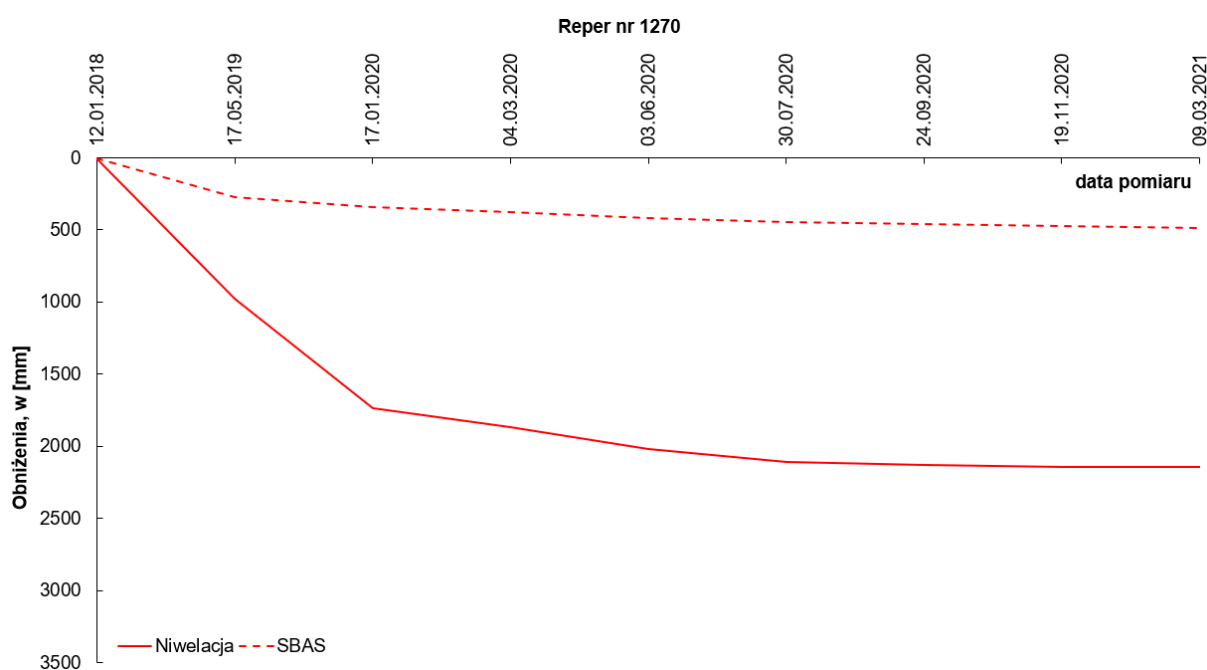
**Rys. 5.17.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach w terenie górniczym KWK ROW Ruch Marcel (opracowanie własne).



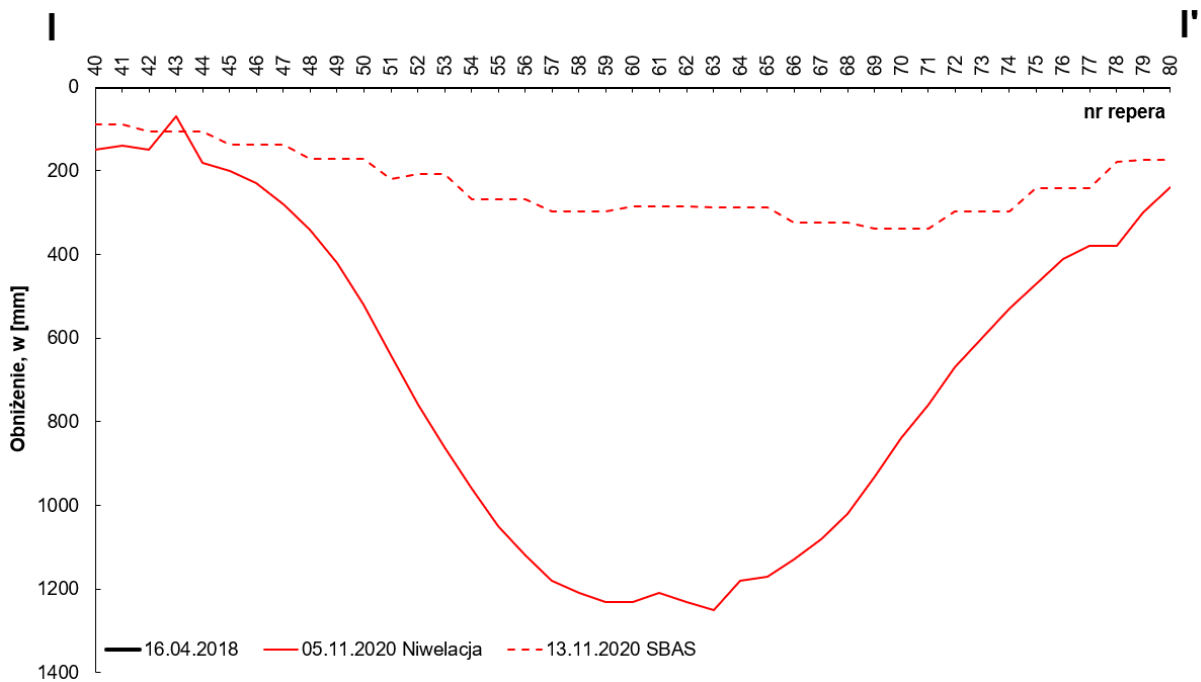
**Rys. 5.18.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr W-93 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach w terenie górniczym KWK ROW Ruch Marcel (opracowanie własne).



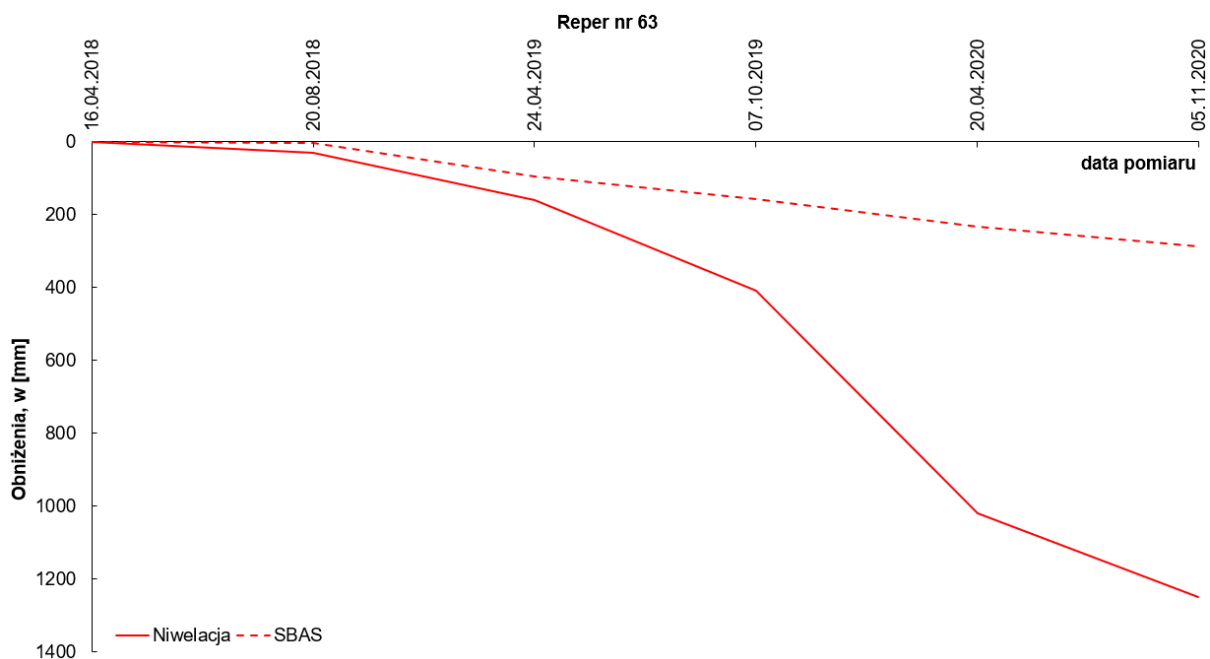
**Rys. 5.19.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. 1-go Maja w Rudzie Śląskiej w terenie górniczym KWK Ruda Ruch Pokój (obecnie SRK Oddział KWK Pokój I – Pokój II) (opracowanie własne).



**Rys. 5.20.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 1270 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. 1-go Maja w Rudzie Śląskiej w terenie górniczym KWK Ruda Ruch Pokój (obecnie SRK Oddział KWK Pokój I – Pokój II) (opracowanie własne).



**Rys. 5.21.** Porównanie wartości obniżenia zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Pszczyńskiej w Jastrzębiu Zdroju w terenie górniczym KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka (opracowanie własne).



**Rys. 5.22.** Porównanie obniżenia w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 63 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Pszczyńskiej w Jastrzębiu Zdroju w terenie górniczym KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka (opracowanie własne).

Analizując sporządzone wykresy (rys. 5.5 – 5.22) od razu widać duże niedoszacowanie wyników uzyskanych z przetwarzania zobrażeń SAR względem pomiarów geodezyjnych. Różnice są dobrze widoczne na wykresach przedstawiających całą nieckę obniżeniową oraz



obniżenia danego repera w funkcji czasu. Największe różnice mają miejsce w rejonach największych obniżeń. Dobre dopasowanie występuje na obrzeżach niecek, gdzie obniżenia powierzchni są mniejsze. Z wykresów przedstawiających obniżenie repera w funkcji czasu wynika, w którym momencie następuje wzrost różnicy między wynikami SBAS, a pomiarami geodezyjnymi. Jest to w momencie wzrostu prędkości obniżania się powierzchni terenu. Dla przykładu, obniżenie zmierzone na reperze nr 32 (rys. 5.8) przez pierwsze 3,5 miesiąca (od 13.11.2020 do 26.02.2021) wyniosło 95 mm, czyli średnia prędkość to około 27 mm/miesiąc. Różnica z wynikami SBAS w dniu 26.02.2021 wynosi 56 mm. Przez kolejne 3 miesiące (od 26.02.2021 do 21.05.2021) powierzchnia obniżyła się o kolejne 470 mm (do 565 mm od początku cyklu pomiarowego) to jest w tempie 157 mm/miesiąc. W tym momencie różnica z pomiarami SBAS wzrosła do 498 mm w dniu 21.05.2021. W kolejnych 3 miesiącach (od 21.05.2021 do 16.08.2021) nastąpiło wyhamowanie obniżania się powierzchni do 63 mm/miesiąc. Sumaryczne obniżenie od początku cyklu na dzień 16.08.2021 r. wynosiło 754 mm, a różnica z pomiarami SBAS wzrosła do 651 mm. Podobne zjawisko można zaobserwować na większości z analizowanych reperów (rys. 5.6, 5.8, 5.16, 5.18, 5.20, 5.22). Z danych wynika, że wzrost prędkości obniżania się powierzchni oznacza wzrost różnicy między wynikami otrzymanymi z przetwarzania zobrażeń SAR, a wynikami uzyskanymi z pomiarów geodezyjnych. Należy również zwrócić uwagę na deformacje zmierzone na terenie górniczym ZG EKO – PLUS Sp. z o.o. na 3 liniach pomiarowych (rys. 5.9, 5.11, 5.13). Maksymalne obniżenia nie przekraczają 400 mm w ciągu niespełna 3 lat. Przypadek ten nie spełnia zatem kryterium „dużych deformacji” zdefiniowanych w rozdziale 2. Przyglądając się wykresom przedstawiającym omawiane deformacje można zauważyć, że błąd niedoszacowania wyników SBAS jest stosunkowo niewielki względem pozostałych przypadków. Wynika to z amplitudy obniżeń w długim okresie.

Wykresy porównawcze obrazują analizowany problem w sposób graficzny. W celu przedstawienia go w postaci ilościowej dla każdej linii pomiarowej obliczono wartości RMSE według wzoru (5.4):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{p=1}^p (w_{GEOD} - w_{SBAS})} \quad (5.4)$$

gdzie:

$p$  – całkowita liczba pomiarów w cyklu,

$w_{GEOD}$  – obniżenia zmierzone klasycznymi metodami geodezyjnymi,

$w_{SBAS}$  – obniżenia wyznaczone z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS.

Wyniki RMSE dla poszczególnych linii pomiarowych zestawiono w tabeli 5.1.

**Tab. 5.1.** Zestawienie wartości RMSE dla analizowanych linii pomiarowych.

L.p.	Kopalnia	Linia pomiarowa	Nr rysunku	RMSE [mm]
1	KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast	Bieruń ul. Warszawska	5.1	799
2	KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast	Bieruń ul. Węglowa	5.3	1057
3	KWK Bobrek – Piekary Ruch Bobrek	Bytom ul. Karbowska	5.5	5657
4	ZG EKO – PLUS Sp. z o. o.	Bytom ul. Celna	5.7	131
5	ZG EKO – PLUS Sp. z o. o.	Bytom rej. ul. Celnej na południe od A1	5.9	148
6	ZG EKO – PLUS Sp. z o. o.	Bytom rej. ul. Celnej na północ od A1	5.11	235
7	KWK ROW Ruch Marcel	Marklowice ul. Wyzwolenia	5.13	8823
8	KWK Ruda Ruch Pokój	Ruda Śląska ul. 1 – go Maja	5.15	5099
9	KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka	Jastrzębie Zdrój ul. Pszczyńska	5.17	3027

Jak wynika z tabeli 5.1 wartości RMSE są bardzo duże sięgające nawet 9000 mm w przypadku kopalni ROW Ruch Marcel. Warto nadmienić, że w tym przypadku obniżenia maksymalne przekroczyły 3000 mm. Mniejsze wartości RMSE są dla obniżeń występujących w terenie górniczym ZG EKO – PLUS Sp. z o.o., na poziomie 131 – 235 mm. Jak już pisano, obniżenia w tym rejonie nie przekroczyły 400 mm w ciągu 33 miesięcy.

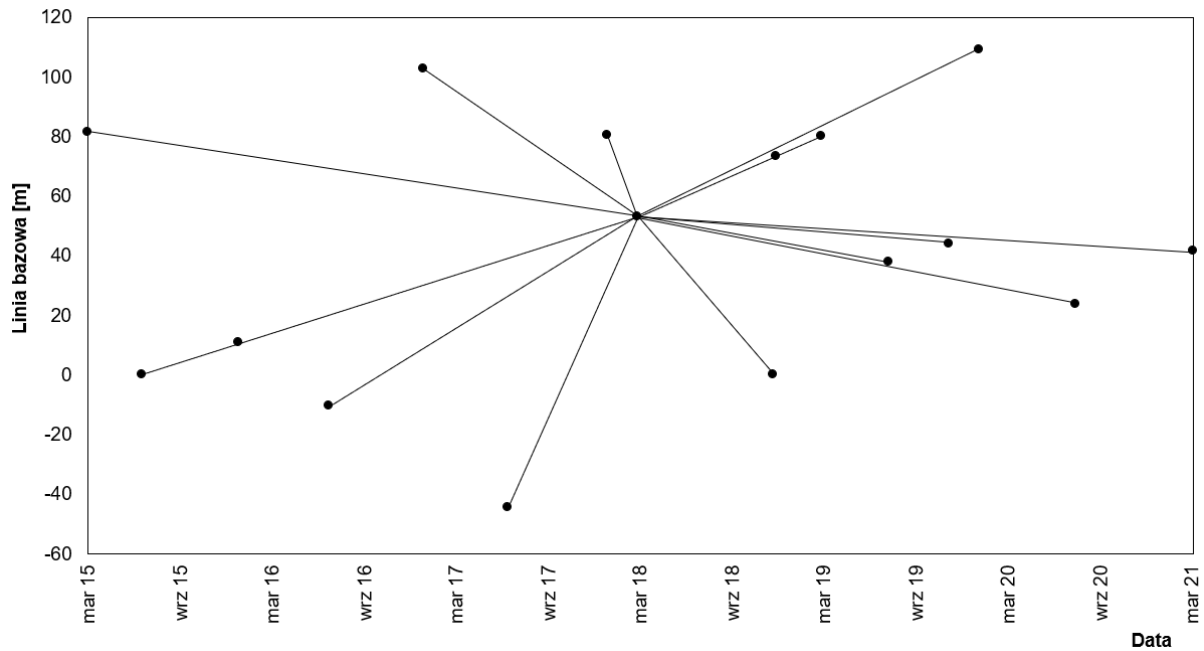
Walidacja wyników obniżeń otrzymanych z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS wskazuje, duże niedoszacowanie względem klasycznych pomiarów geodezyjnych. **Można zatem stwierdzić, że klasyczna metoda SBAS nie sprawdza się w warunkach GZW i konieczne jest stosowanie dodatkowych rozwiązań w celu identyfikacji dużych obniżeń.** Potwierdza to problem wykrywania dużych obniżeń z zastosowaniem interferometrii satelitarnej, w sposób teoretyczny przedstawiony w rozdziale 1, oraz celowość niniejszej pracy. Ponadto, dobre dopasowanie wyników SBAS na obrzeżach niecek obniżeniowych wskazuje przydatność rezultatów do badania zasięgu deformacji górniczych.

## 5.2. Przetwarzanie zobrażeń SAR metoda PSInSAR

### 5.2.1. Opis metody

Metoda permanentnych rozpraszaczy PSInSAR została opracowana na początku XXI w. przez Ferretti i zespół (2000, 2001). Głównym założeniem metody jest przetwarzanie stosu

zobrazowań, w którym wszystkie zobrazowania referencyjne porównywane są do jednego zobrazowania wzorcowego (rys. 5.23).



**Rys. 5.23.** Przykład połączeń par zobrazowań w metodzie PSInSAR; każdy punkt definiuje jedno zobrazowanie SAR, a linie symbolizują interferogramy (opracowanie własne).

Obliczenia wykonywane są dla tak zwanych stabilnych rozpraszaczy (ang. *permanent scatterers, PS*). Dobór punktów PS odbywa się w oparciu o dwa czynniki. Pierwszym z nich jest dyspersja amplitudy określana wzorem (5.5) (Ferretti i in. 2001):

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (5.5)$$

gdzie:

$\sigma$  – odchylenie standardowe,

$\mu$  – wartość średnia amplitudy,

Zalecana wartość dyspersji amplitudy, przy doborze punktów PS, jest w przedziale 0,25 – 0,4. Wadą tego podejścia jest możliwość stosowania go wyłącznie na terenach silnie zurbanizowanych, ponieważ charakteryzują się one wysoką oraz stabilną amplitudą odbicia sygnału. Drugim czynnikiem, na podstawie którego mogą być dobierane punkty PS, jest czasowa koherencja danego piksela (Hooper i in. 2004). Duża liczba zobrazowań, wykorzystanych w przetwarzania PSInSAR umożliwia oszacowanie, a następnie usunięcie błędów generowanych poprzez wpływ atmosfery na sygnał (ang. *Atmospheric Phase Screen, APS*). Jest to możliwe przez zastosowanie dolnoprzepustowego filtra w dziedzinie

przestrzennej oraz interpolacji metodą Krigingu. Poza dwiema podstawowymi metodami doboru punktów PS, na przestrzeni lat opracowano również inne sposoby takie jak:

- metoda IPTA (*ang. Interferometric Point Target Analysis*) (Werner i in. 2003),
- metoda DePSI (*ang. Delft Persistent Scatterer Interferometry*) (Kampes 2006),
- metoda CPT (*ang. Coherent Pixel Technique*) (Blanco-Sanchez i in. 2008),
- metoda PSP (*ang. Persistent Scatterer Pairs*) (Costantini i in. 2008),
- metoda SPN (*ang. Stable Points Network*) (Crosetto i in. 2008),
- metoda SqueeSAR (Ferretti i in. 2009).
- metoda QPS (*ang. Quasi Persistent Scatterers*) (Perissin, Wang 2012).

Istotne jest również, że metoda PSInSAR pozwala na wykrywanie ruchów powierzchni rzędu 1 – 3 mm i 0,1 – 0,5 mm/rok w przypadku średniego tempa deformacji, co zostało udowodnione w sposób analityczny i eksperymentalny przez Colesanti i współautorów (2003).

#### 5.2.2. Metodyka obliczeń przeprowadzonych metodą PSInSAR

Do obliczeń metodą PSInSAR wykorzystano zobrazowania typu SLC pochodzące z konstelacji europejskich satelitów Sentinel 1A i Sentinel 1B, z opadającej ścieżki satelity nr 124, które są udostępniane nieodpłatnie w ramach programu Copernicus. Stos liczył 409 zobrazowań SAR (frame 422 – 427) wykonanych w okresie od 24.04.2015 do 30.03.2022 roku. Proces przetwarzania został podzielony na 6 mniej więcej równych około rocznych lub półtorarocznych okresów (odpowiednio: 12, 12, 12, 18, 17 i 13 miesięcy). Podział wynikał z charakterystyki zastosowanej metody obliczeniowej, w której do jednego, z reguły środkowego, zobrazowania wzorcowego porównywane są pozostałe (zobrazowania wtórne), a im dłuższy okres tym większa dekorelacja sygnału. W oparciu o analizę wykonaną przez Delgado Blasco i zespół (2019) można stwierdzić, że ponieważ badania były prowadzone na terenie silnie zurbanizowanym (centrum miasta) kilkumiesięczna różnica w czasowej linii bazowej (cykl 4 i 5 – odpowiednio 18 i 17 miesięcy) nie miała większego wpływu na liczbę uzyskanych PS, co później zostało potwierdzone w otrzymanych wynikach. W związku z tym powstało 6 mniejszych zbiorów, które przetwarzane były na zakładkę tzn. ostatnie zobrazowanie zbioru pierwszego było pierwszym zobrazowaniem zbioru drugiego.

W pierwszym kroku dla każdego zbioru wybrano zobrazowanie wzorcowe tak aby uzyskać kombinację danych SAR o krótkich liniach bazowych i żeby znajdowało się w okolicach środka zbioru według czasowej linii bazowej. W tym celu wykorzystano oprogramowanie typu open source The ESA Sentinel Application Platform (SNAP), które umożliwia użytkownikom przetwarzanie danych satelitarnych pochodzących między innymi

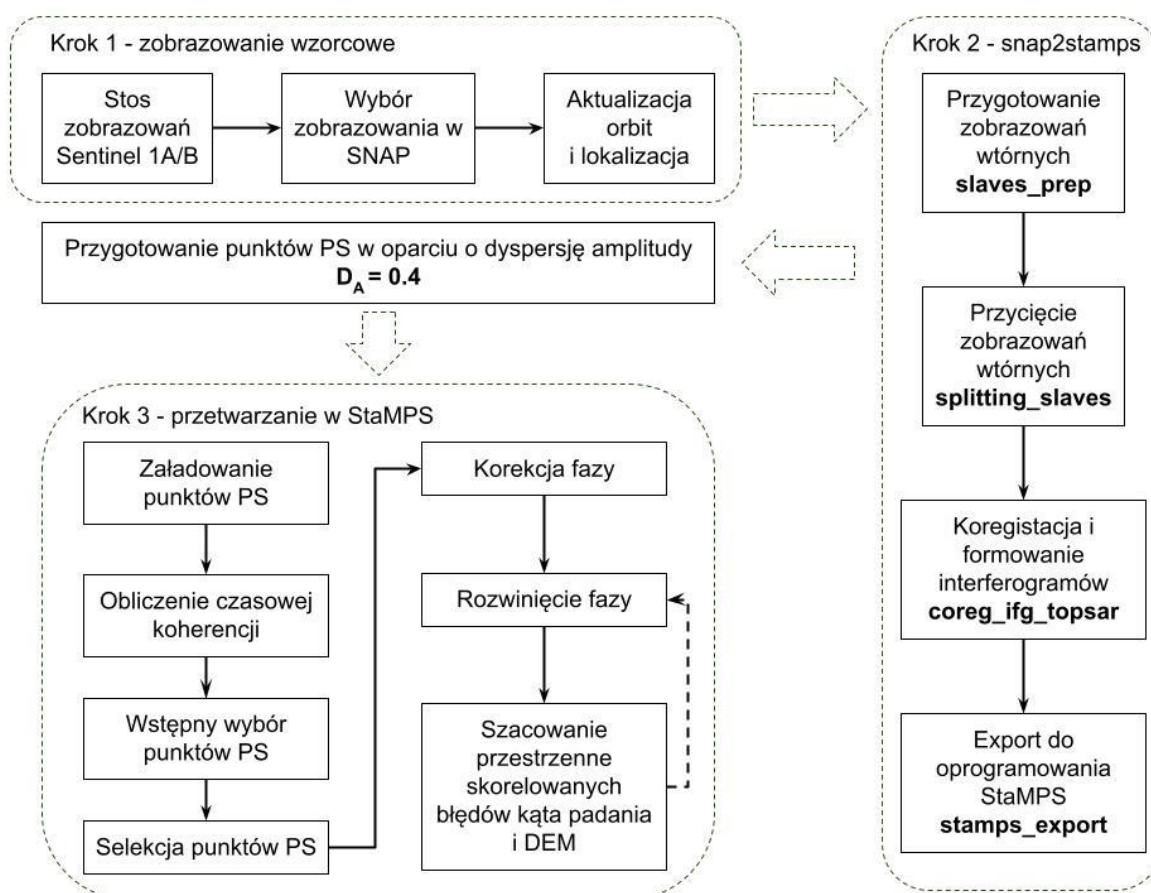
z satelity Sentinel 1 (Desnos i in. 2016). Przy użyciu wspomnianego oprogramowania zaktualizowano również dane o precyzyjnych orbitach dla zobrazowań wzorcowych i ograniczono ich zasięg przestrzenny do odpowiedniej lokalizacji. Kolejny krok obejmował wygenerowanie interferogramów różnicowych dla każdego stosu, przy użyciu gotowych algorytmów *pythona snap2stamps* (Foumelis i in. 2018). Obliczenie interferogramów zostało poprzedzone posortowaniem stosów według daty akwizycji (*slaves prep*) oraz przycięciem zobrazowań wtórnych do odpowiedniej lokalizacji (*splitting slaves*). Następnie całość danych wyeksportowano do oprogramowania StaMPS (ang. *Stanford Method for Persistent Scatterers*) (Hooper i in 2012), w którym zaimplementowana jest metoda PSInSAR, a dobór punktów PS oparty jest o dyspersję amplitudy  $D_A$ . W celu ustalenia jej dokładnej wartości dokonano krótkiej analizy statystycznej. Przetworzono wszystkie 6 stosów dla dyspersji amplitudy równej 0.25, 0.30, 0.32, 0.35 oraz 0.40. Następnie obliczono liczbę otrzymanych punktów PS oraz średnią i medianę otrzymanych wyników. Zbiór o najmniejszej liczbie skrajnych, odstających punktów PS powinien charakteryzować się niewielką różnicą pomiędzy medianą, a średnią wyników. Uzyskane rezultaty zestawiono w tabeli 5.2.

**Tab. 5.2.** Wyniki analizy statystycznej dotyczącej wyboru odpowiedniej wartości dyspersji amplitudy do przetwarzania zobrazowań satelitarnych metodą PSInSAR.

stos	I	II	III	IV	V	VI
okres obliczeniowy	24.04.2015 – 30.04.2016	30.04.2016 – 01.05.2017	01.05.2017 – 02.05.2018	02.05.2018 – 05.11.2019	05.11.2019 – 21.02.2021	21.02.2021 – 30.03.2022
$D_A$	0.25					
liczba ps	16426	6702	13580	11269	14457	11977
średnia	-0,82	-4,07	1,32	1,58	-1,50	-0,20
mediana	-0,67	-4,17	1,43	1,71	-1,36	0,04
różnica	0,15	<b>-0,10</b>	0,11	0,13	0,14	0,24
$D_A$	0.30					
liczba ps	32640	16854	28140	23736	28977	24207
średnia	-0,81	-4,09	-0,01	1,60	-1,42	-0,16
mediana	-0,71	-4,23	0,04	1,74	-1,29	0,07
różnica	0,10	-0,14	<b>0,05</b>	0,13	0,13	0,24
$D_A$	0.32					
liczba ps	41775	23131	35994	30271	35797	30707
średnia	-0,82	-4,03	1,22	1,59	-1,42	-0,15
mediana	-0,72	-4,17	1,32	1,72	-1,29	0,07
różnica	0,10	-0,14	0,10	0,13	0,12	0,22
$D_A$	0.35					
liczba ps	59004	35771	49921	42105	49816	42814
średnia	-0,78	-3,97	1,22	1,58	-1,31	-0,11
mediana	-0,72	-4,13	1,31	1,71	-1,21	0,10

różnica	0,07	-0,16	0,08	0,13	0,10	0,21
$D_A$	0.40					
liczba ps	95207	67816	84682	69977	82322	70312
średnia	-0,78	-3,91	1,17	1,51	-1,22	-0,05
mediana	-0,75	-4,06	1,27	1,63	-1,14	0,16
różnica	<u>0,04</u>	-0,15	0,10	<u>0,11</u>	<u>0,08</u>	<u>0,21</u>

Z tabeli 5.2 wynika, że najmniejsza różnica pomiędzy medianą, a średnią otrzymanych wyników ze stosu II jest dla  $D_A = 0.25$ , a ze stosu III dla  $D_A = 0.30$ . Natomiast dla pozostałych czterech stosów najmniejsza różnica jest dla  $D_A = 0.40$ , w związku z tym do dalszych obliczeń, dla wszystkich stosów, przyjęto wartość dyspersji amplitudy równą 0,40. Dodatkowym aspektem *in plus* jest liczba PS, która naturalnie dla  $D_A=0.40$  jest największa spośród wszystkich badanych. W kolejnym kroku łańcuch przetwarzania wszystkich stosów metodą PSInSAR przebiegał według 7 etapów opisanych w podręczniku użytkownika StaMPS (Hooper i in. 2018). Przebieg procesu przetwarzania obrazów SAR metodą PSInSAR pokazano na rysunku 5.24.

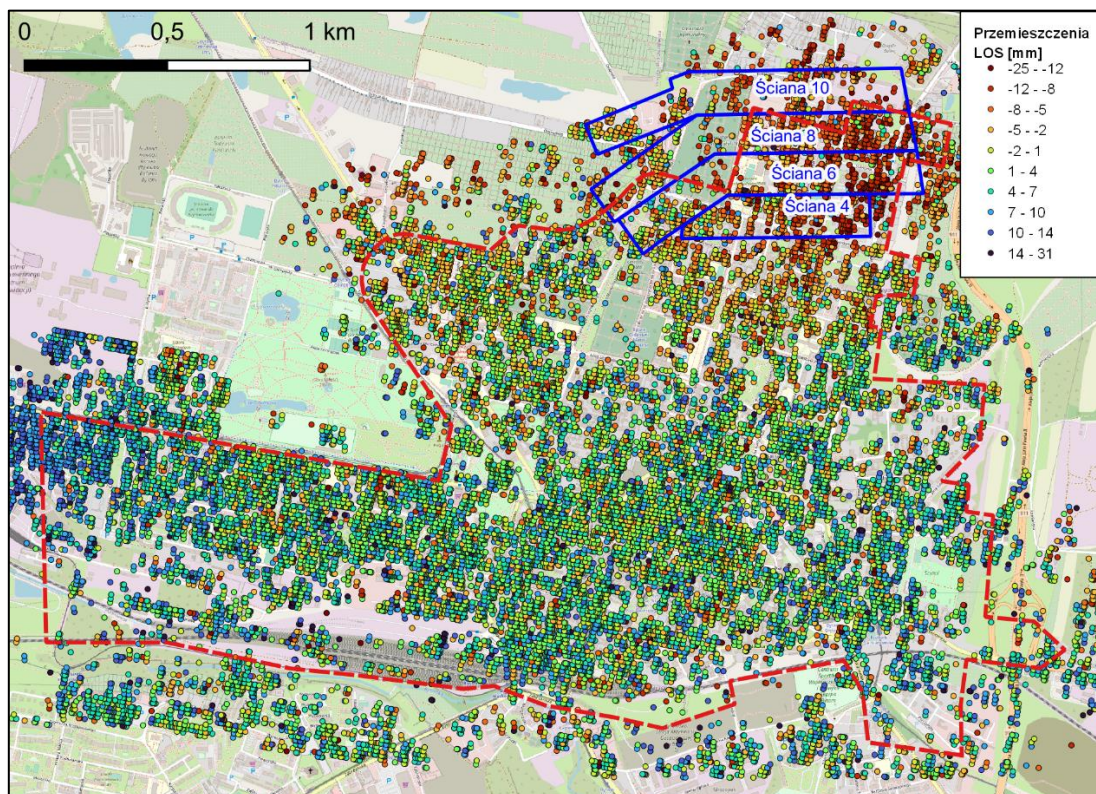


**Rys. 5.24.** Schemat postępowania podczas procesu przetwarzania obrazów SAR metodą PSInSAR (opracowanie własne).

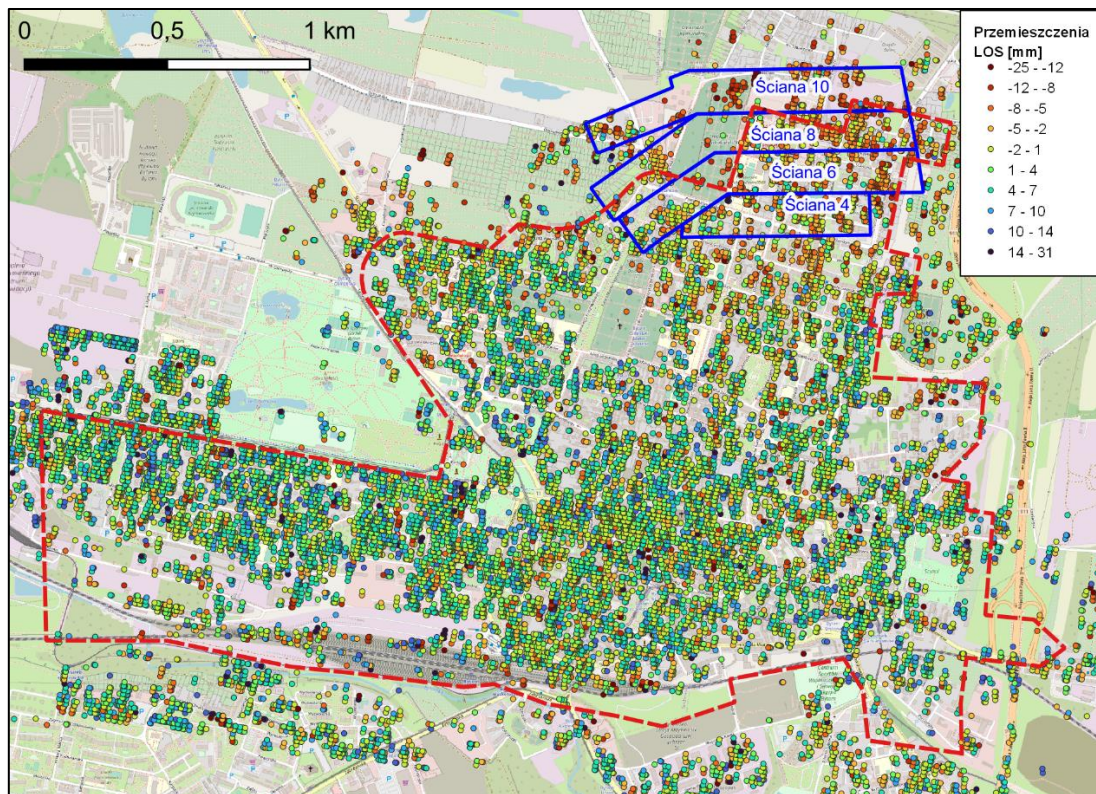
Obliczenia według opisanej metodyki (rys. 5.6) przeprowadzono dla rejonu filara ochronnego Śródmieścia Bytomia. Rezultatem przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR były skumulowane w 6-cio i 12-sto dniowych interwałach, przemieszczenia powierzchni w kierunku LOS, które miały miejsce w następujących kolejno po sobie około rocznych okresach po zakończeniu eksploatacji górniczej.

### 5.2.3. Analiza wyników otrzymanych z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR

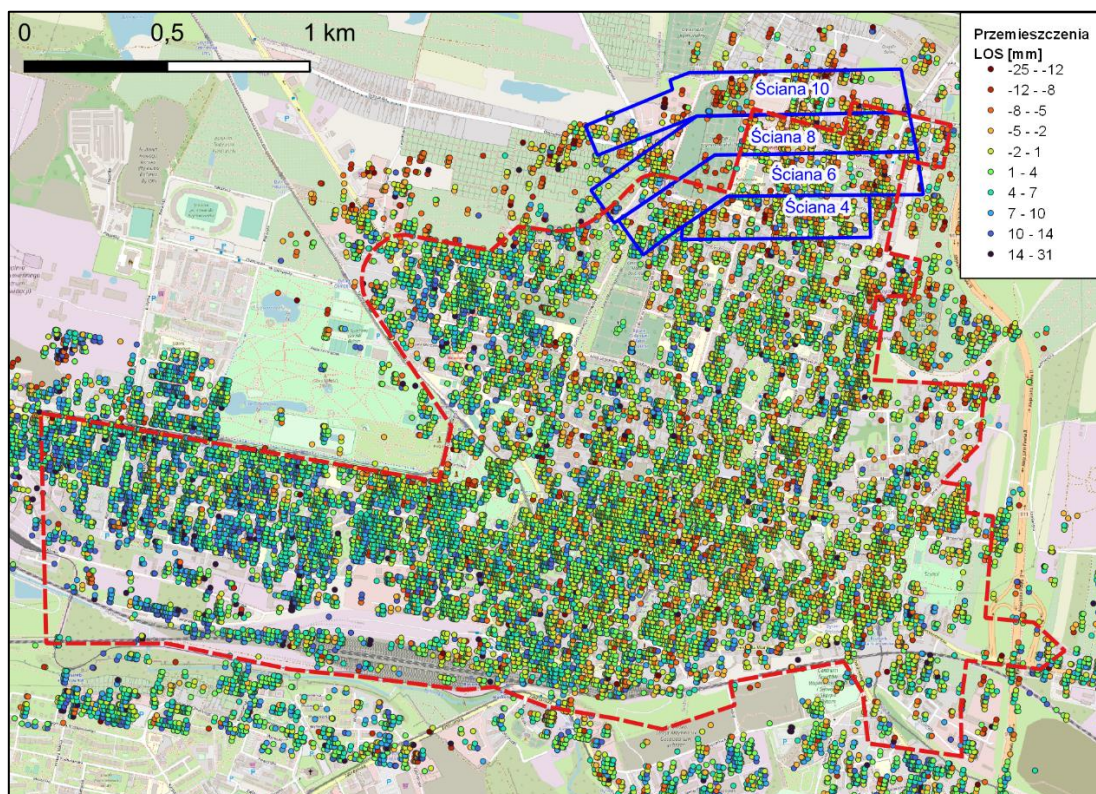
Skumulowane przemieszczenia powierzchni w kierunku LOS zostały przedstawione w formie graficznej na rysunkach 5.25 – 5.30. Każdy z nich reprezentuje jeden okres obliczeniowy, a przemieszczenia pokazane są w formie wektorowych punktów PS. Otrzymane wyniki wyraźnie wskazują na formowanie się niecki obniżeniowej w północnej części filara ochronnego, to jest w rejonie ostatniej eksploatacji pokładu 510 w warstwie dolnej (szczegółowy opis - patrz rozdział 4.2). Największe obniżenia, dochodzące do 30 mm, zmierzono w pierwszym roku po zakończeniu eksploatacji to jest w okresie od 24.04.2015 – 30.04.2016 r. (rys. 5.25).



**Rys. 5.25.** Punkty PS reprezentujące przemieszczenie powierzchni w kierunku LOS w okresie 24.04.2015 – 30.04.2016, wyznaczone z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR – układ WGS84, EPSG:4326 (opracowanie własne).

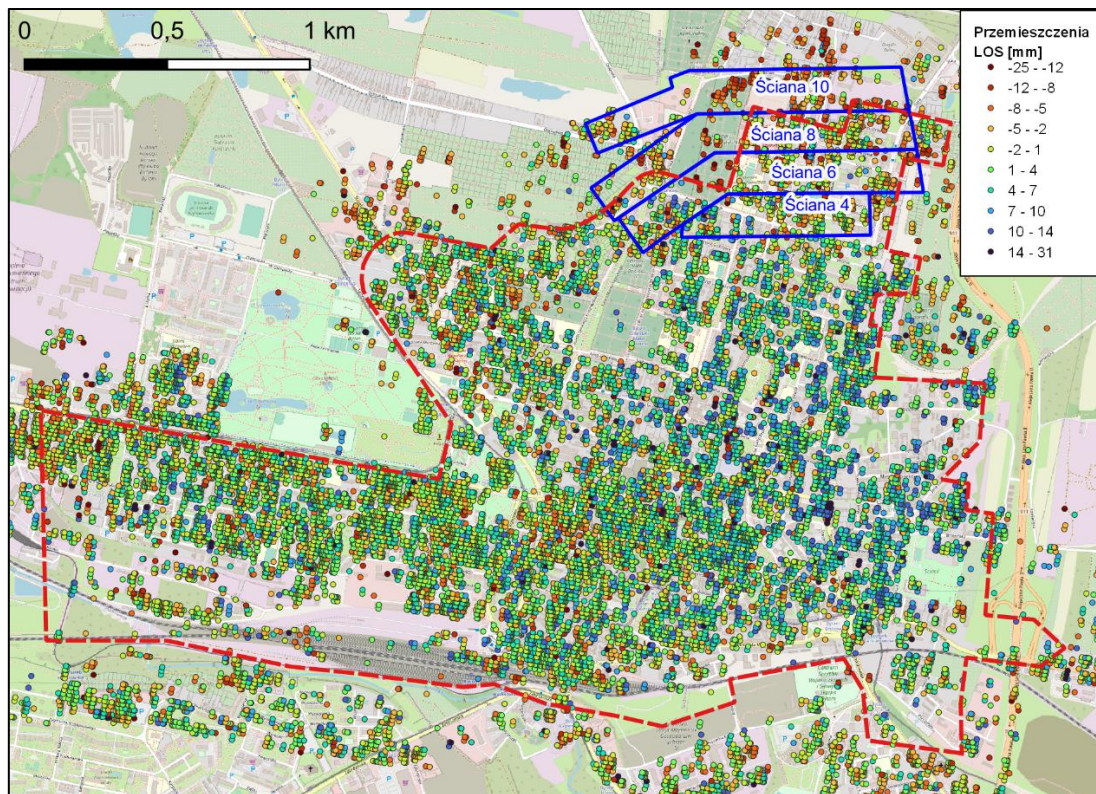


**Rys. 5.26.** Punkty PS reprezentujące przemieszczenie powierzchni w kierunku LOS w okresie 30.04.2016 – 01.05.2017, wyznaczone z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR – układ WGS846, EPSG:4326 (opracowanie własne).

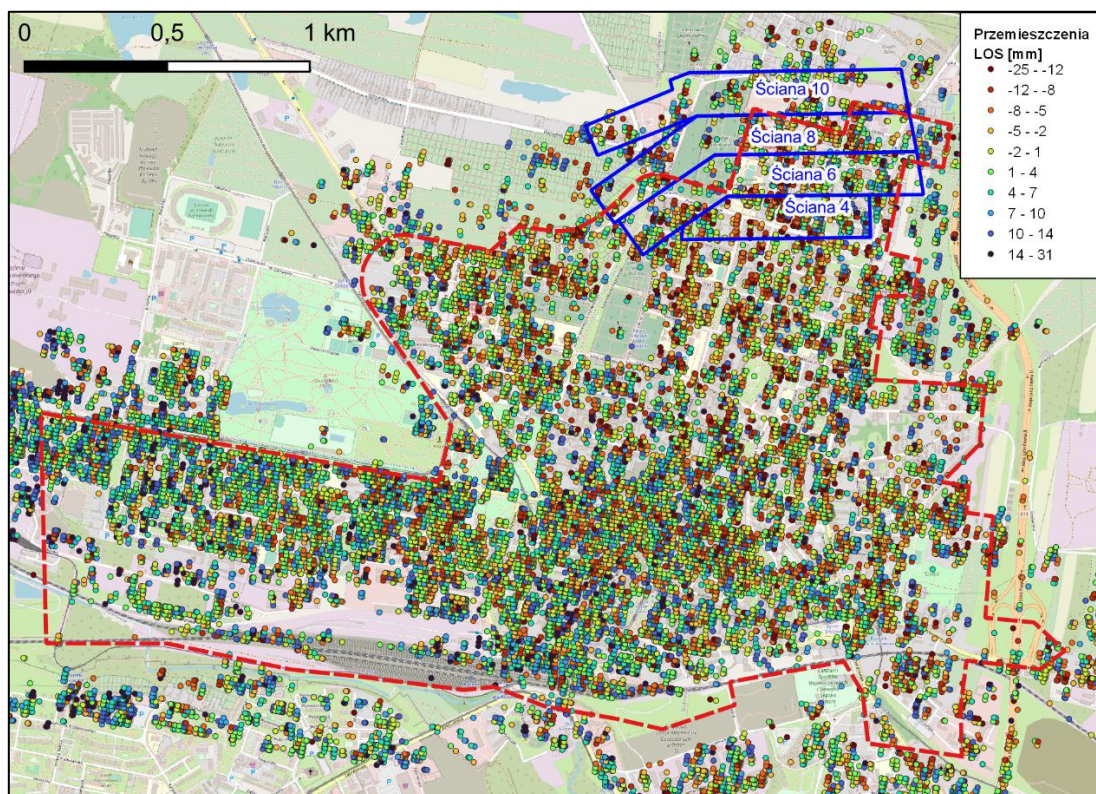


**Rys. 5.27.** Punkty PS reprezentujące przemieszczenie powierzchni w kierunku LOS w okresie 01.05.2017 – 02.05.2018, wyznaczone z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR – układ WGS846, EPSG:4326 (opracowanie własne).

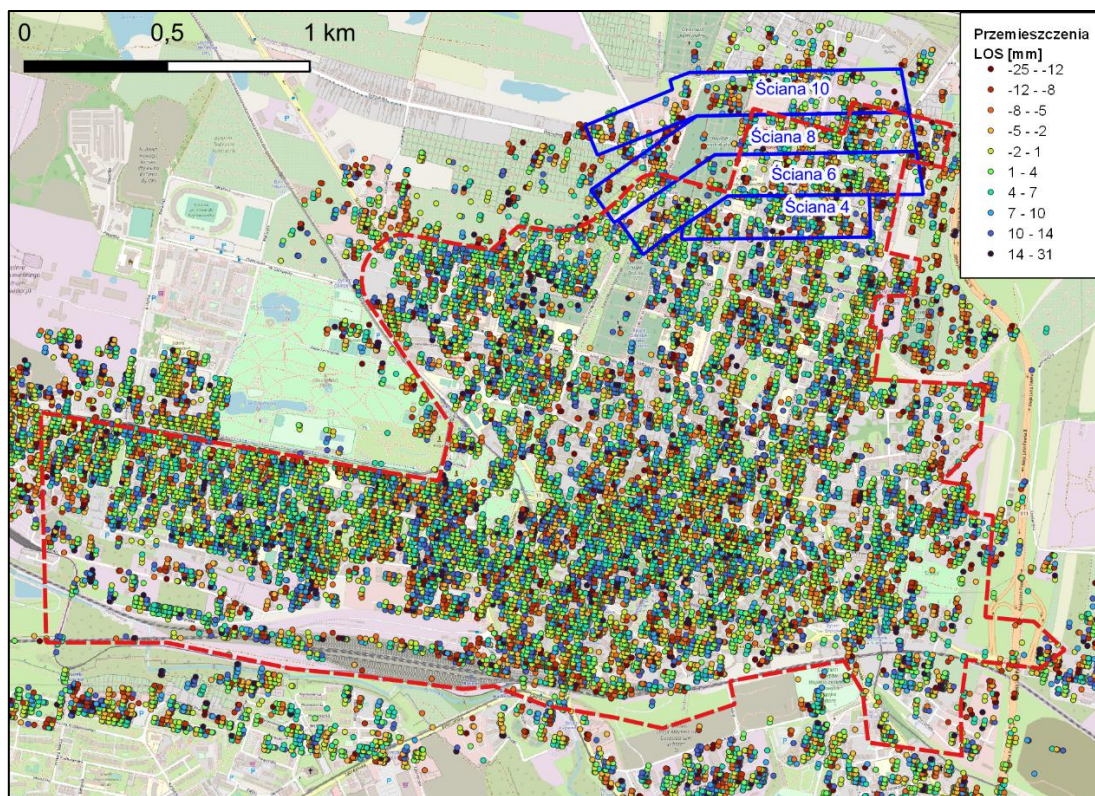




**Rys. 5.28.** Punkty PS reprezentujące przemieszczenie powierzchni w kierunku LOS w okresie 02.05.2018 – 05.11.2019, wyznaczone z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR – układ WGS846, EPSG:4326 (opracowanie własne).



**Rys. 5.29.** Punkty PS reprezentujące przemieszczenie powierzchni w kierunku LOS w okresie 05.11.2019 – 21.02.2021, wyznaczone z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR – układ WGS846, EPSG:4326 (opracowanie własne).



**Rys. 5.30.** Punkty PS reprezentujące przemieszczenie powierzchni w kierunku LOS w okresie 21.02.2021 – 30.03.2022, wyznaczone z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR – układ WGS846, EPSG:4326 (opracowanie własne).

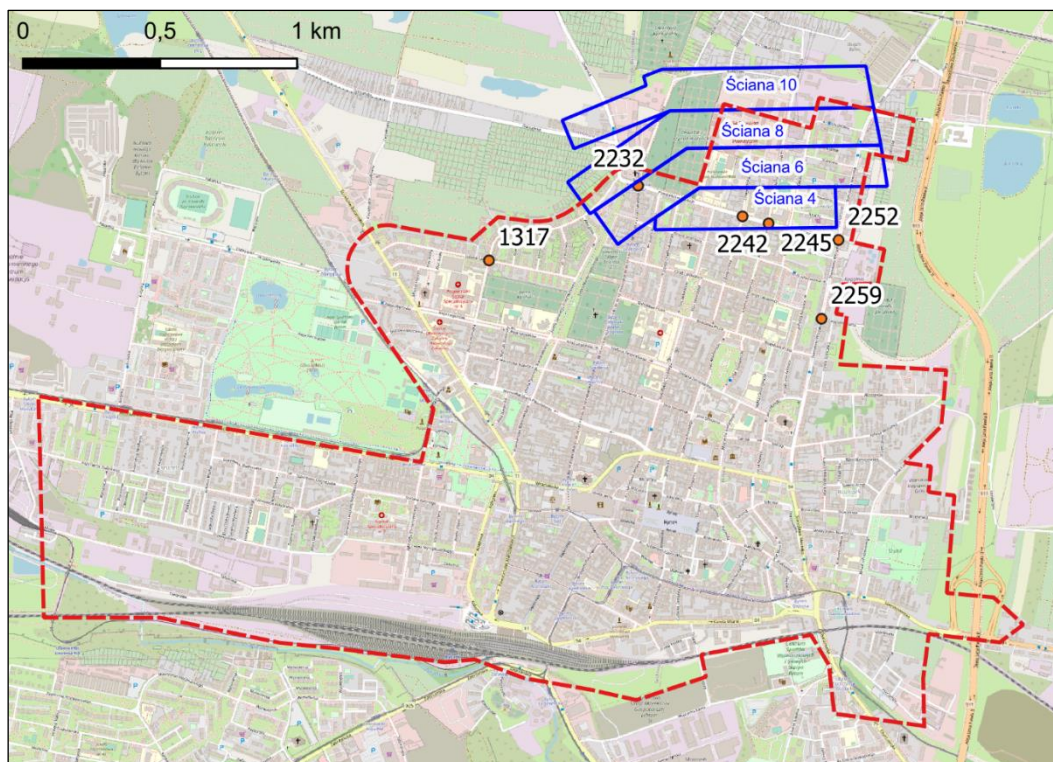
W kolejnych latach następowało ponowne obniżanie się powierzchni w północnej części filara, jednak na mniejszą skalę. W cyklach pomiarowych obejmujących okres 30.04.2016 – 01.05.2017 oraz 01.05.2017 – 02.05.2018 powierzchnia obniżyła się o kolejne 20 mm w każdym z nich (rys. 5.26, 5.27). Po 02.05.2018 można zaobserwować uspokojenie się powierzchni względem poprzednich lat, nie mniej jednak nadal na niektórych punktach PS notowane jest obniżenie (rys. 5.28). Nie formuje się zatem klasyczna niecka obniżeniowa, a następują punktowe ruchy powierzchni w kierunku LOS sięgające około 10 mm. Jest to dobry przykład pokazujący możliwości metody PSInSAR do wykrywania lokalnych resztkowych ruchów powierzchni. Uspokojenie powierzchni jest widoczne w ostatnich dwóch okresach to jest 05.11.2019 – 30.03.2022 r. (rys. 5.29, 5.30). Analizując cały badany obszar niemożliwe jest zaobserwowanie niecki w rejonie ostatniej eksploatacji.

W przypadku pozostałej części filara ochronnego śródmieścia Bytomia, gdzie eksploatację zakończono ponad 20 lat temu, nie zachodzą wyraźne zmiany. W okresie 24.04.2015 – 05.11.2019 (rys. 5.25 – 5.28) mają miejsce niewielkie ruchy powierzchni, zarówno obniżenia jak i wypiętrzenia, mieszające się granicach dokładnościowych zastosowanej metody PSInSAR (Colesanti i in. 2003). W okresie 05.11.2019 – 30.03.2022 ruchy te również mają miejsce na jeszcze większą skalę (rys. 5.29, 5.30). Wahają się w przedziale  $\pm 10$  mm

i występują w całym obszarze badanego rejonu. Nie ma natomiast jednego miejsca o wyraźnym trendzie, w którym następowaloby obniżenie lub wypiętrzenie. W związku z tym należy uznać, że jest to wynik pogorszenia się jakości przetwarzania obrazów SAR metodą PSInSAR w dwóch ostatnich okresach obliczeniowych, który uwidacznia się w większych wahanich wyników.

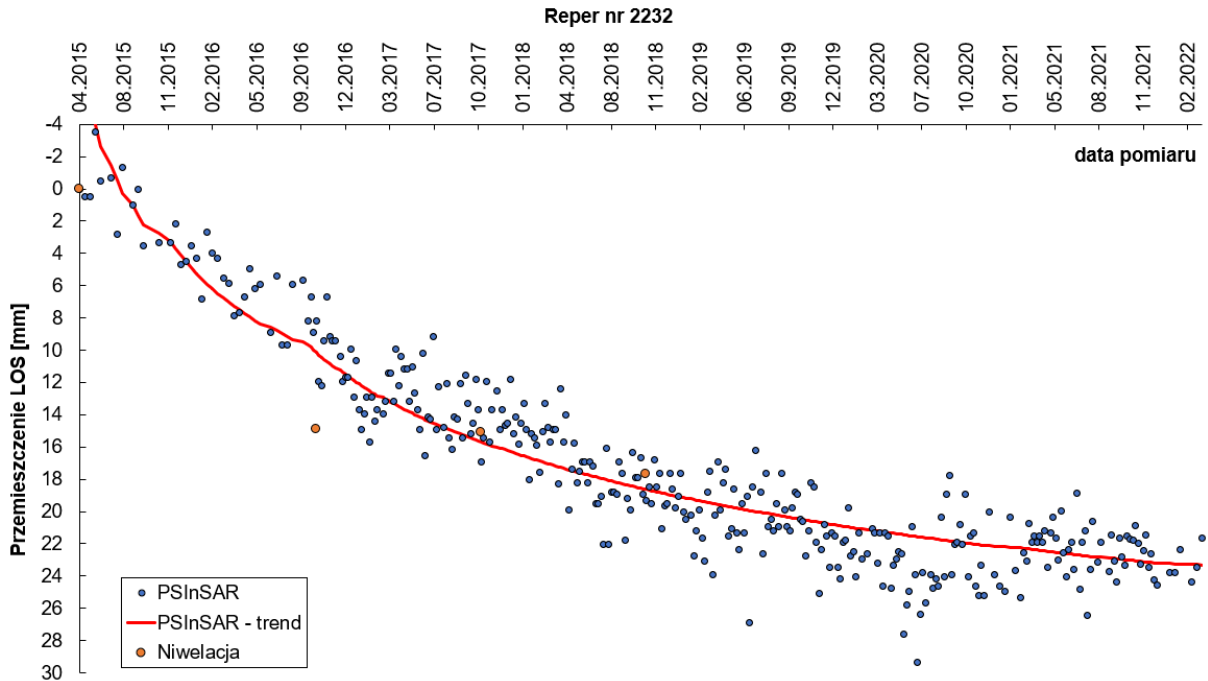
#### 5.2.4. Walidacja wyników otrzymanych z przetwarzania obrazów SAR metodą PSInSAR

Walidację wyników otrzymanych z przetwarzania obrazów SAR metodą PSInSAR (rys. 5.25 – 5.30) przeprowadzono w oparciu o 4 repery (nr 2232, 2242, 2245, 2252), na których wykonywane były pomiary w około rocznych interwałach, do października 2018 roku, z zastosowaniem klasycznych metod geodezyjnych. Repery zlokalizowane były w północnej części filara ochronnego śródmieścia Bytomia (rys. 5.31). Pomiary realizowane były łącznie na 6 reperach ale dwa z nich umiejscowione były poza wpływami eksploatacji (repery nr 1317, 2259). Najbardziej intensywne ruchy powierzchni miały miejsce do kilku lat po zakończeniu eksploatacji, dlatego pomimo braku możliwości porównania całego okresu pomiarowego, walidację wyników należy uznać za wiarygodną.

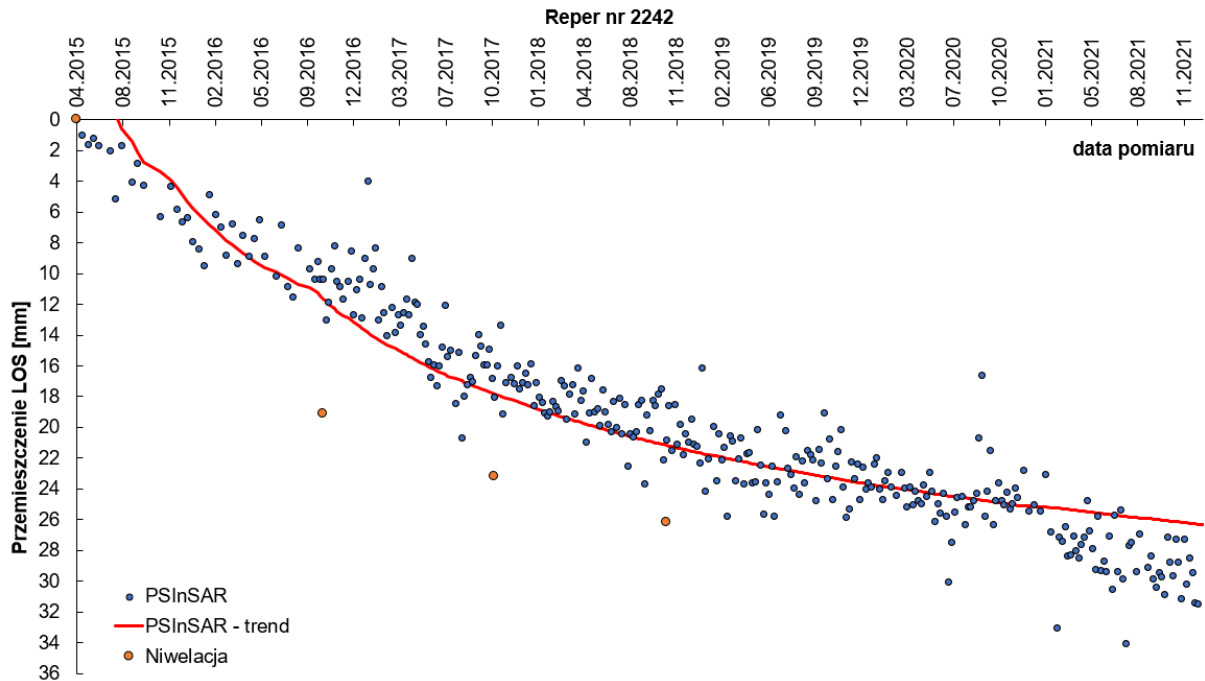


**Rys. 5.31.** Lokalizacja reperów pomiarowych wykorzystanych do walidacji wyników uzyskanych z przetwarzania obrazów SAR metodą PSInSAR wraz z ostatnią prowadzoną eksploatacją w pokładzie 510 w.d. (linie niebieskie) w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia (linia czerwona przerywana) – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).

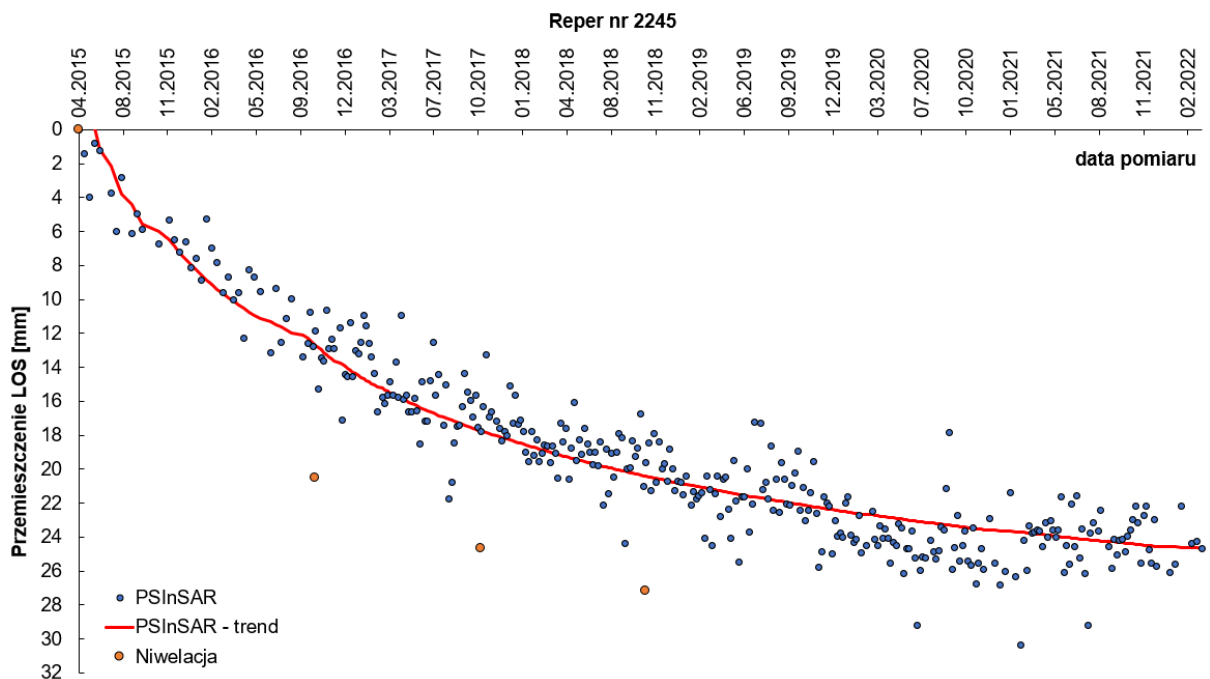
Lokalizacja punktów PS nie jest dokładnie taka sama jak lokalizacja reperów geodezyjnych. Ponadto, różni się również między poszczególnymi okresami pomiarowymi zastosowanymi w przetwarzaniu zobrażeń SAR metodą PSInSAR. Aby uzyskać jednoznaczne obniżenie powierzchni z punktów PS w miejscach lokalizacji reperów geodezyjnych, wyniki zostały uśrednione z obszaru o promieniu równym 40 m wokół danego repera, a następnie zsumowane z poszczególnych okresów pomiarowych (procedura wyznaczenia wartości promienia - patrz rozdział 8.2.1). Wyniki przedstawiono na 4 kolejnych wykresach (rys. 5.32 – 5.35).



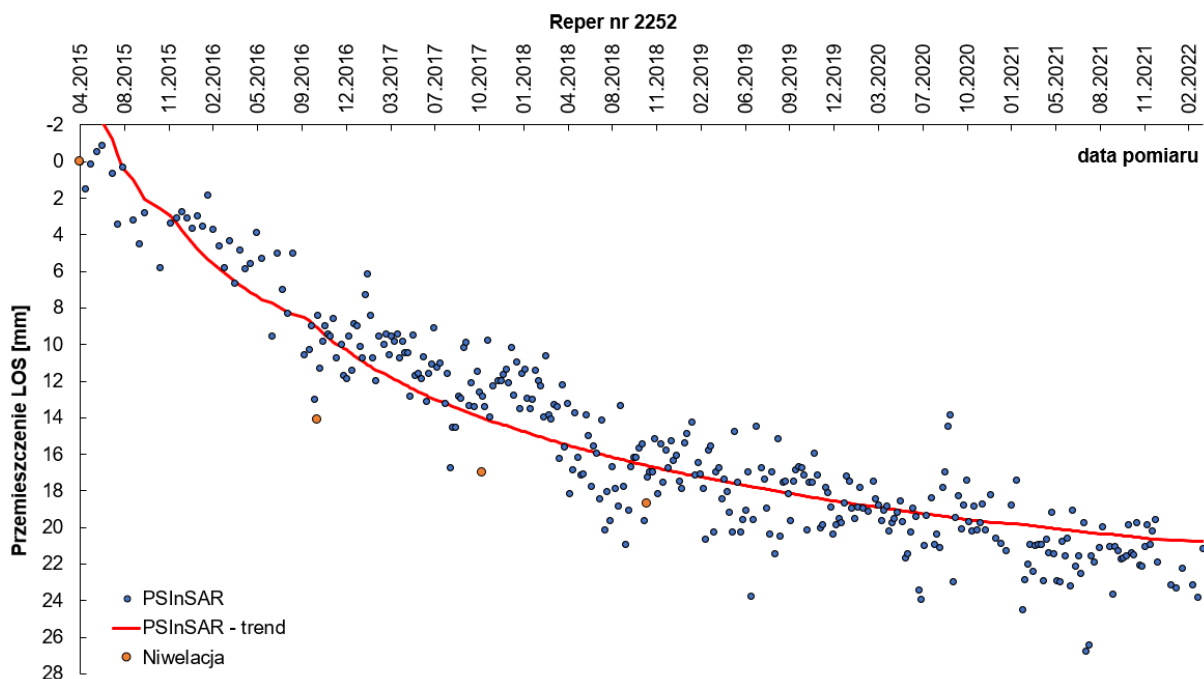
**Rys. 5.32.** Wykres przedstawiający przemieszczenia powierzchni w kierunku LOS w funkcji czasu uzyskane z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR wraz z dopasowaną linią trendu oraz obniżenia pionowe w funkcji czasu, pomierzone z wykorzystaniem klasycznych pomiarów geodezyjnych, na reperze nr 2232, zlokalizowanym w północnej części filara ochronnego Śródmieścia Bytomia (opracowanie własne).



**Rys. 5.33.** Wykres przedstawiający przemieszczenia powierzchni w kierunku LOS w funkcji czasu uzyskane z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR wraz z dopasowaną linią trendu oraz obniżenia pionowe w funkcji czasu, pomierzone z wykorzystaniem klasycznych pomiarów geodezyjnych, na reperze nr 2242, zlokalizowanym w północnej części filara ochronnego Śródmieścia Bytomia (opracowanie własne).



**Rys. 5.34.** Wykres przedstawiający przemieszczenia powierzchni w kierunku LOS w funkcji czasu uzyskane z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR wraz z dopasowaną linią trendu oraz obniżenia pionowe w funkcji czasu, pomierzone z wykorzystaniem klasycznych pomiarów geodezyjnych, na reperze nr 2245, zlokalizowanym w północnej części filara ochronnego Śródmieścia Bytomia (opracowanie własne).



**Rys. 5.35.** Wykres przedstawiający przemieszczenia powierzchni w kierunku LOS w funkcji czasu uzyskane z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR wraz z dopasowaną linią trendu oraz obniżenia pionowe w funkcji czasu, pomierzone z wykorzystaniem klasycznych pomiarów geodezyjnych, na reperze nr 2252, zlokalizowanym w północnej części filara ochronnego Śródmieścia Bytomia (opracowanie własne).

Na wykresach (rys. 5.32 – 5.35) widać różnice między obniżeniami zmierzonymi klasycznymi metodami geodezyjnymi, a wyznaczonymi z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR. Nie mniej jednak są to różnice małe, rzędu milimetrów. Najlepsze dopasowanie widać na reperze nr 2232 (rys. 5.32). Tylko w pierwszym pomiarze wykonanym w październik 2016 roku jest niewielkie odchylenie. Według pomiarów geodezyjnych powierzchnia obniżyła się o 15 mm, a z pomiarów PSInSAR wynika, że o około 10 mm. Na pozostałych 3 wykresach widać natomiast niewielkie niedoszacowanie. Według pomiarów geodezyjnych powierzchnia obniżyła się średnio o 6 mm więcej, niż według pomiarów PSInSAR na reperze nr 2242 (rys. 5.33), o 7 mm na reperze nr 2245 (rys. 5.34) oraz o 3 mm na reperze 2252 (rys. 5.35). W celu zestawienia różnic w postaci ilościowej obliczono wartości RMSE dla obniżeń występujących na każdym reperze (tab. 5.3).

**Tab. 5.3.** Zestawienie wartości RMSE dla poszczególnych reperów.

L.p.	Reper	RMSE [mm]
1	2232	2
2	2242	10
3	2245	13
4	2252	6

Jak wynika z tabeli 5.3, największy RMSE wyniósł 13 mm na reperze nr 2245. Na pozostałych analizowanych reperach błędy nie przekroczyły 10 mm. W tym miejscu należy podkreślić, iż

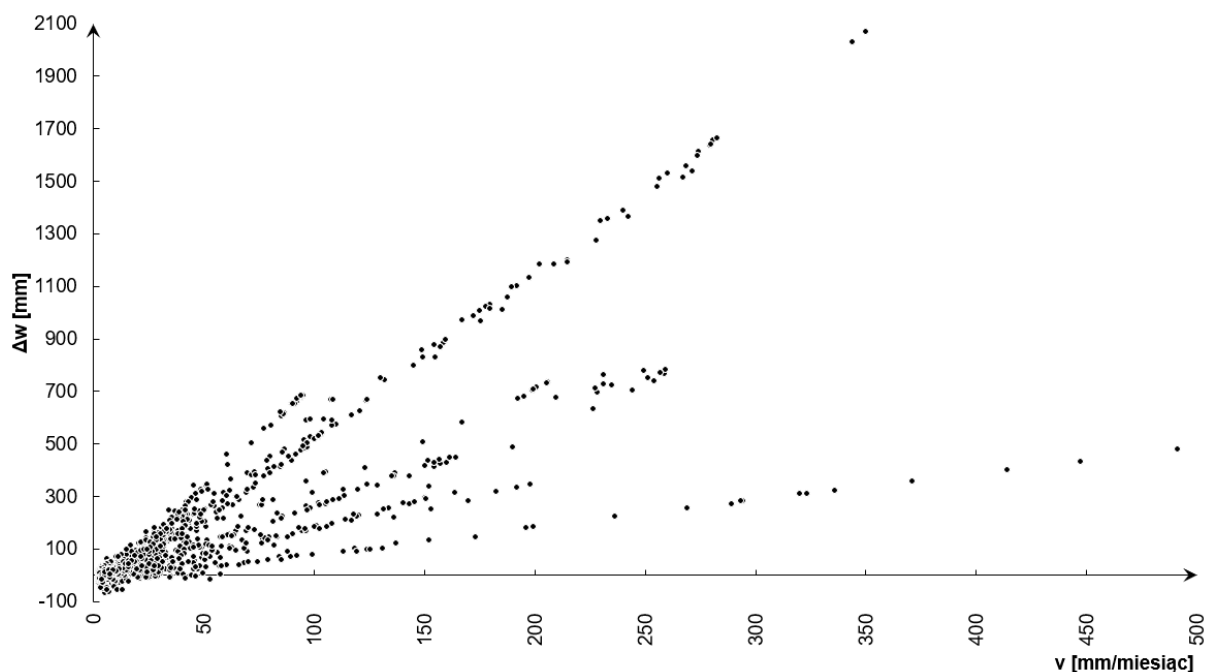
ruchy powierzchni wyznaczone metodą PSInSAR są w kierunku wzroku satelity LOS, a zmierzone klasycznymi metodami geodezyjnymi w kierunku pionowym. Naturalne, w takim przypadku, jest występowanie pewnych różnic, które są obserwowane w postaci RMSE na poziomie milimetrycznym.

Biorąc pod uwagę powyższą analizę, a w szczególności niewielkie wartości RMSE pomimo porównywania obniżenia powierzchni w różnych kierunkach (pionowym i LOS), wyniki uzyskane z przetwarzania obrazów SAR metodą PSInSAR należy uznać za wiarygodne i mogą one służyć do analizy zanikania czasu deformacji na badanym obszarze.

## 6. Wyznaczania dużych obniżeń z zastosowaniem pomiarów InSAR - SBAS

### 6.1. Analiza zależności pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a niedoszacowaniem wyników InSAR - SBAS

Przeprowadzona walidacja wyników obniżeń powierzchni uzyskanych z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS w oparciu o wyniki klasycznych pomiarów geodezyjnych (patrz rozdział 5.1.4) wstępnie wykazała istnienie zależności pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a niedoszacowaniem wyników SBAS. Dla potwierdzenia, sporządzono zbiorowy wykres, na którym przedstawiono wielkości błędów pomiędzy wynikami SBAS, a pomiarami geodezyjnymi odniesione do prędkości obniżania się powierzchni obliczonej na podstawie pomiarów geodezyjnych wszystkich analizowanych przypadków (rys. 6.1).

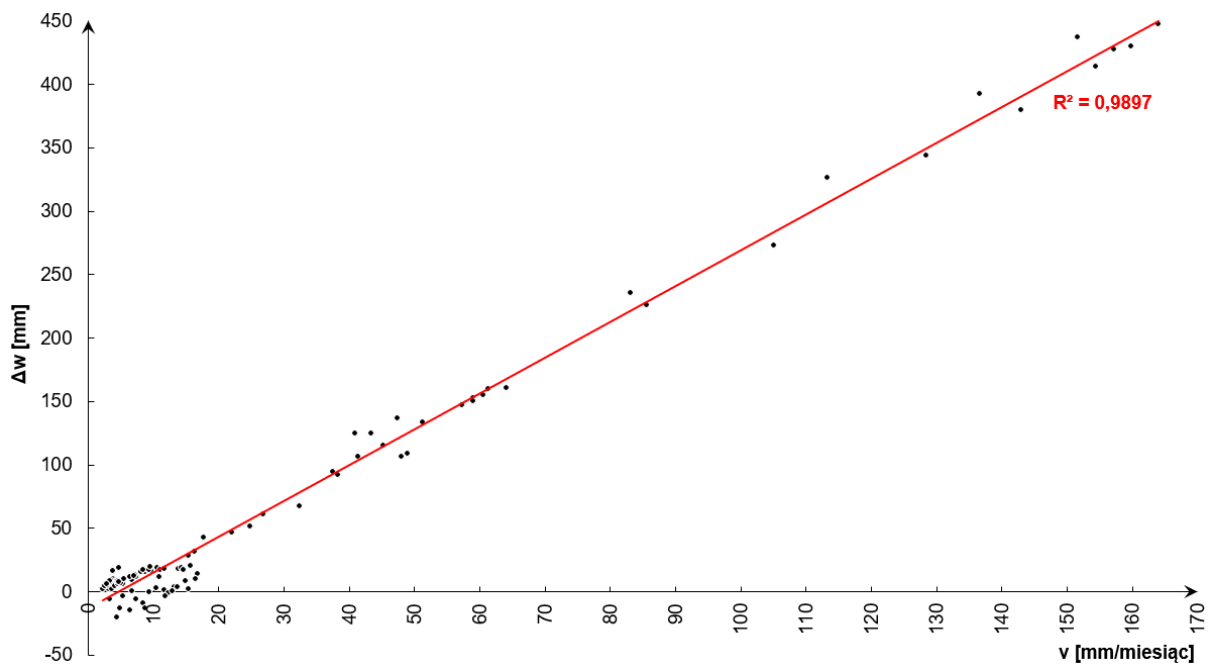


**Rys. 6.1.** Wykres przedstawiający wielkość niedoszacowania wyników SBAS ( $\Delta w$  [mm]) w odniesieniu do prędkości obniżania się powierzchni ( $v$  [mm/miesiąc]) obliczonej na podstawie pomiarów geodezyjnych (opracowanie własne).

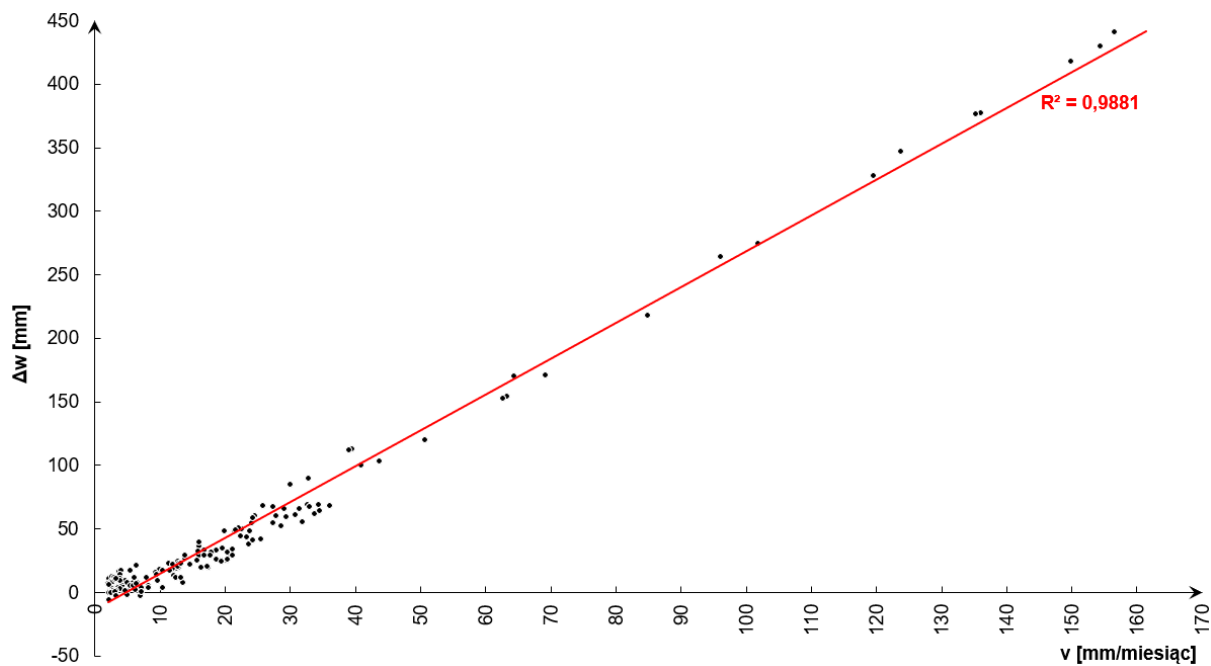
Z wykresu (rys. 6.1) wynika, że wraz ze wzrostem prędkości obniżania się powierzchni wzrasta również błąd pomiędzy obniżeniami uzyskanymi z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS, a obniżeniami zmierzonymi klasycznymi metodami geodezyjnymi. Widać natomiast kilka trendów co wskazuje na złożoność próby i konieczność dalszej analizy zależności dla każdego przypadku (rys. 6.2 – 6.10).



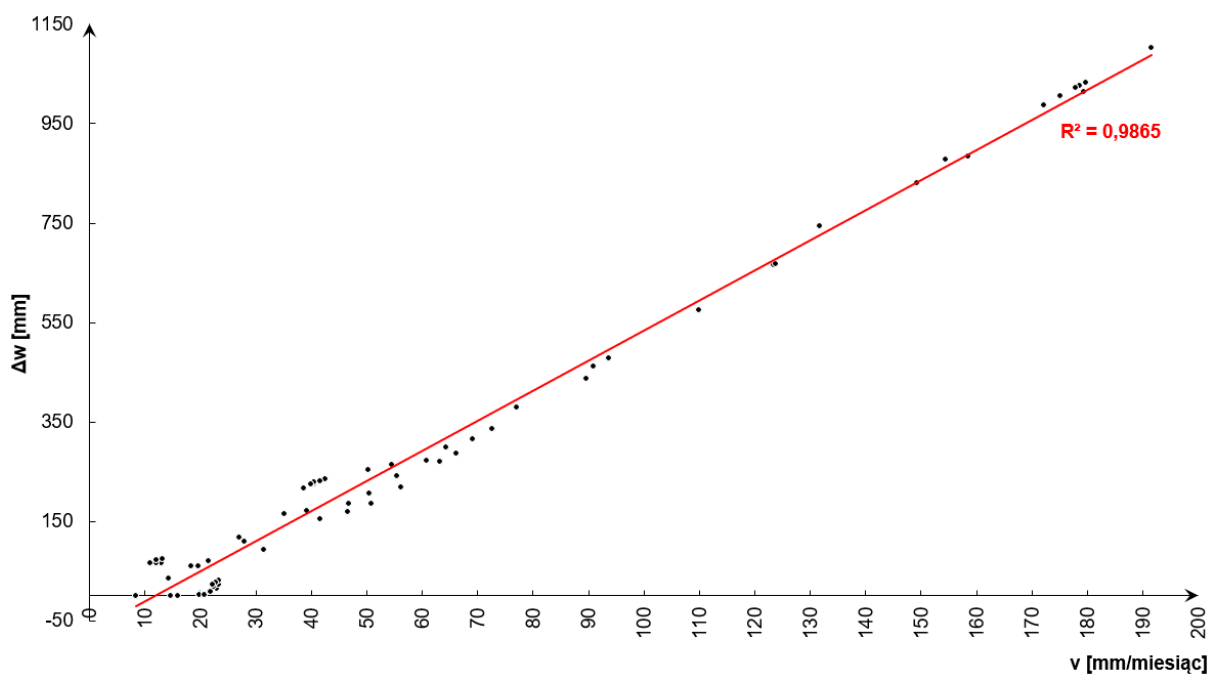
Wykresy (rys. 6.2 – 6.10) potwierdzają zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS względem wyników uzyskanych z klasycznych pomiarów geodezyjnych. Szczególnie dokumentują to przykłady KWK Piast-Ziemowit (rys. 6.2, 6.3), KWK Bobrek – Piekary (rys. 6.4), KWK ROW (rys. 6.8) oraz KWK „Borynia-Zofiówka” (rys. 6.10) gdzie wartość współczynnika determinacji  $R^2$  jest większa od 0,9856. Mniejsze wartości współczynnika (lecz nadal na zadowalającym poziomie) osiągnięto dla linii pomiarowych zlokalizowanych na terenie górniczym ZG EKO-PLUS Sp. z o. o. Dla 3 linii wartość współczynnika determinacji wyniosła odpowiednio 0,8003, 0,8703 i 0,9363. W tym przykładzie nie występują duże deformacje. Pomimo to, nadal istnieje błąd pomiędzy wynikami SBAS, a wynikami uzyskanymi z klasycznych pomiarów geodezyjnych (patrz rozdział 5.1.4, tab. 5.1), a w związku z tym również zależność między błędami, a prędkością obniżania się powierzchni.



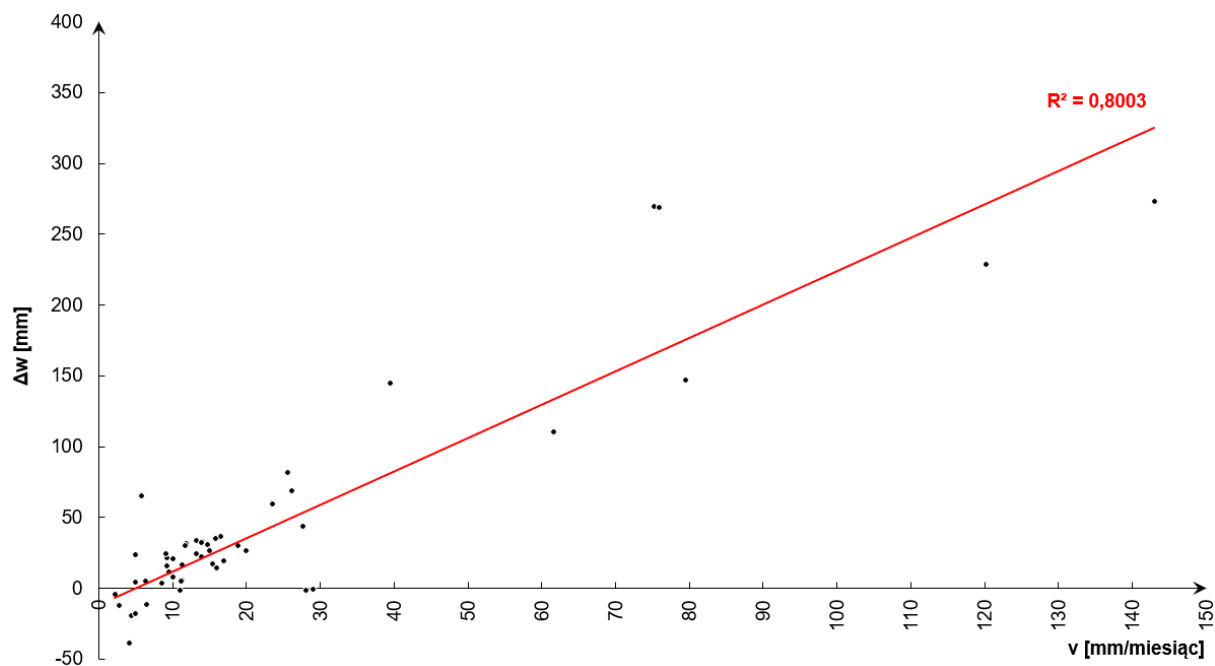
**Rys. 6.2.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast, wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu (opracowanie własne).



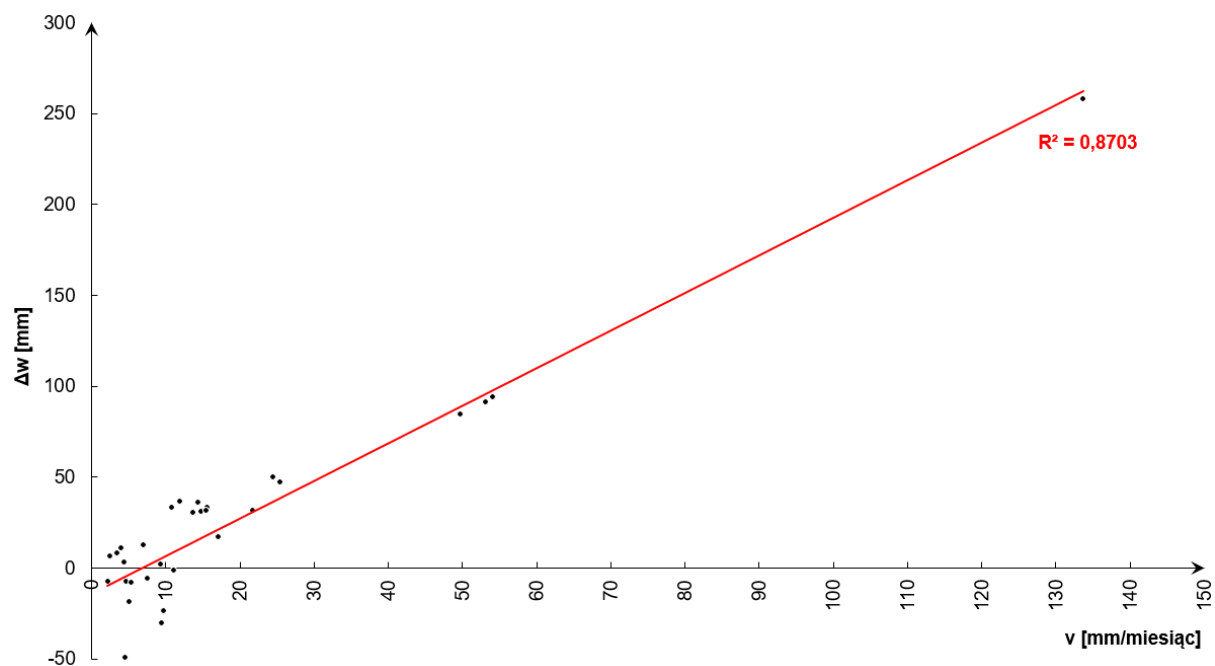
**Rys. 6.3.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast, wzdłuż ul. Węglowej w Bieruniu (opracowanie własne).



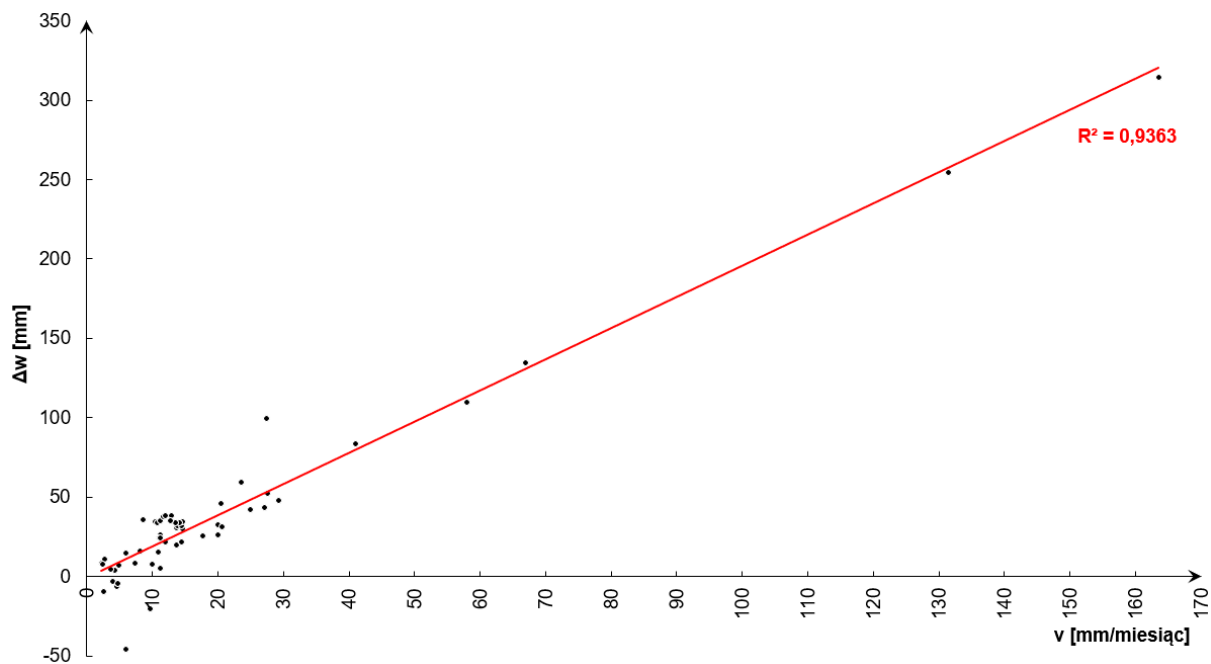
**Rys. 6.4.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Bobrek – Piekary Ruch Bobrek, wzdłuż ul. Karbowskiej w Bytomiu (opracowanie własne).



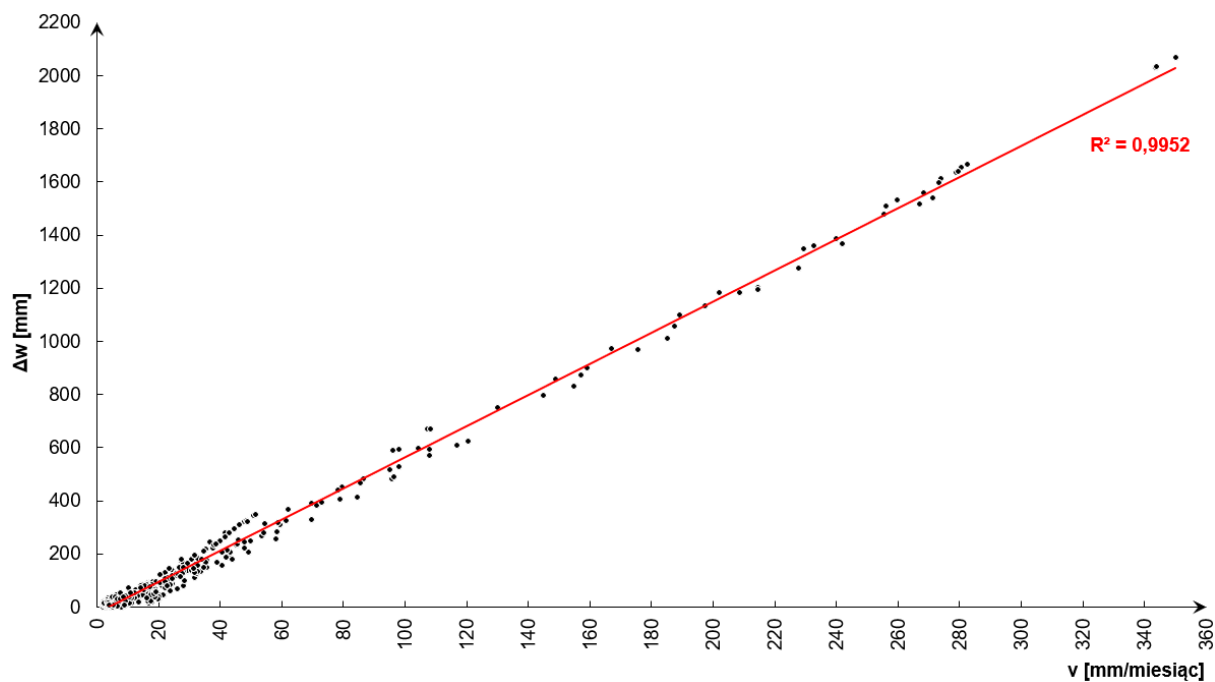
**Rys. 6.5.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym ZG EKO – PLUS Sp. z o. o., wzdłuż ul. Celnej w Bytomiu (opracowanie własne).



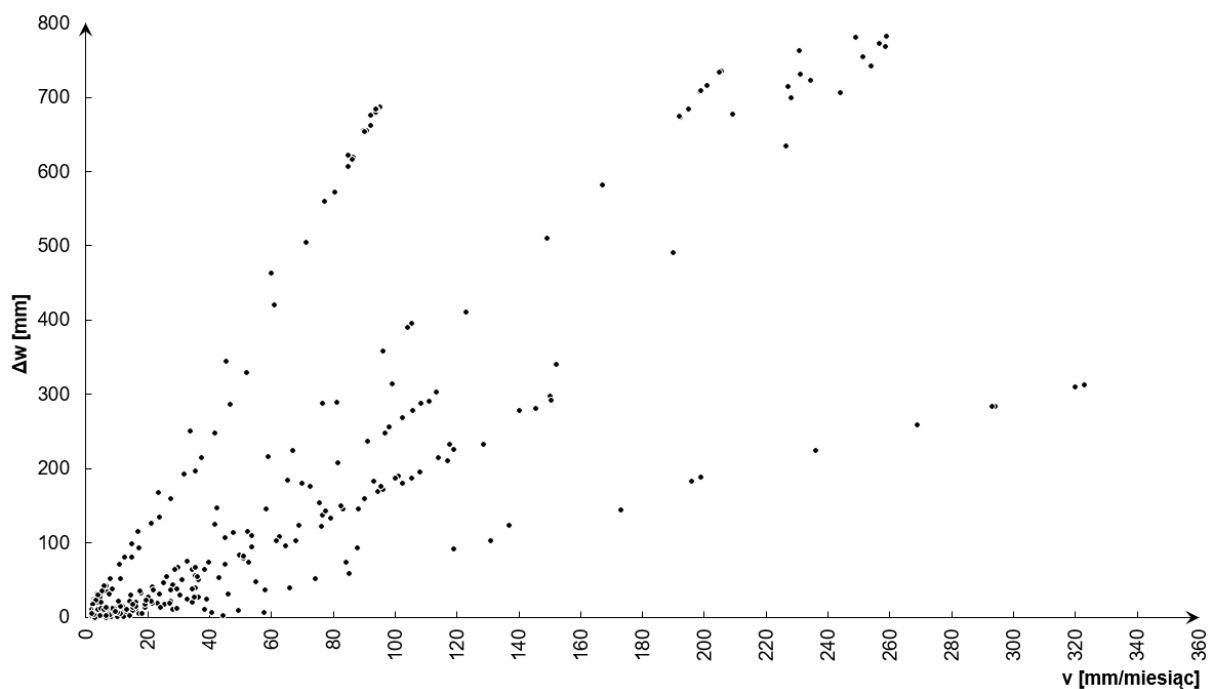
**Rys. 6.6.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym ZG EKO – PLUS Sp. z o. o., na południe od autostrady A1, rejon ul. Celnej w Bytomiu (opracowanie własne).



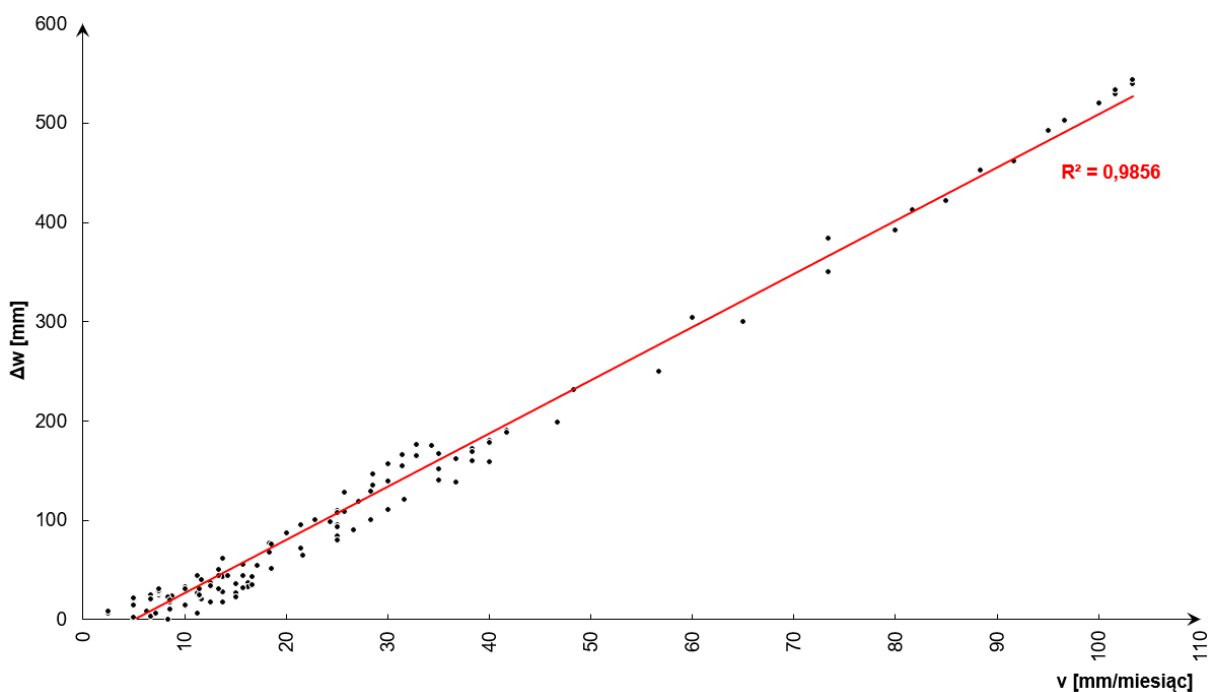
**Rys. 6.7.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym ZG EKO – PLUS Sp. z o. o., na północ od autostrady A1, rejon ul. Celnej w Bytomiu (opracowanie własne).



**Rys. 6.8.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK ROW Ruch Marcel, wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach (opracowanie własne).



**Rys. 6.9.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Ruda Ruch Pokój, wzdłuż ul. 1-go Maja w Rudzie Śląskiej (opracowanie własne).



**Rys. 6.10.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka, wzdłuż ul. Pszczyńskiej w Jastrzębiu Zdroju (opracowanie własne).

Wyjątkiem jest linia pomiarowa zlokalizowana na terenie górniczym KWK Ruda, gdzie wyraźnie widać duże rozproszenie wyników (rys. 6.9), ma ono uzasadnienie w liczbie eksploatowanych ścian i ich różnej prędkości (Kowalski 2020). Rozkładając analizę na

mniejsze okresy pomiarowe możliwe byłoby natomiast uchwycenie lokalnych trendów (dla pojedynczych ścian eksploatacyjnych lub grup o zbliżonej prędkości narastania obniżeń).

Biorąc pod uwagę powyższe należy stwierdzić, że niedoszacowanie wyników SBAS wynika przede wszystkim z prędkości obniżania się powierzchni. Istnieje zależność pomiędzy tymi dwoma czynnikami ale nie jest ona jednoznaczna dla całego GZW, a dla poszczególnych rejonów, a nawet okresów pomiarowych co pokazuje przykład KWK Ruda Ruch Pokój. W związku z tym, do każdego przypadku należy podchodzić indywidualnie.

## **6.2. Wyznaczanie dużych deformacji metodą zależności liniowych**

### *6.2.1. Opis metody*

Metoda zależności liniowych oparta jest o wykazany związek pomiędzy wzrostem prędkości obniżania się powierzchni na skutek eksploatacji górniczej, a wzrostem wielkości niedoszacowania wyników uzyskanych z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS do wyników uzyskanych z pomiarów geodezyjnych. Opis metody przedstawiono na podstawie jednego przykładu demonstracyjnego KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast, linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu.

W pierwszej kolejności konieczne jest określenie prędkości obniżania się powierzchni w miesięcznych interwałach, co najmniej dla 1 punktu zlokalizowanego w obrębie badanego rejonu, przy czym, im więcej dokładnych danych wejściowych, tym należy spodziewać się dokładniejszych rezultatów. Prędkość może być oszacowana na podstawie:

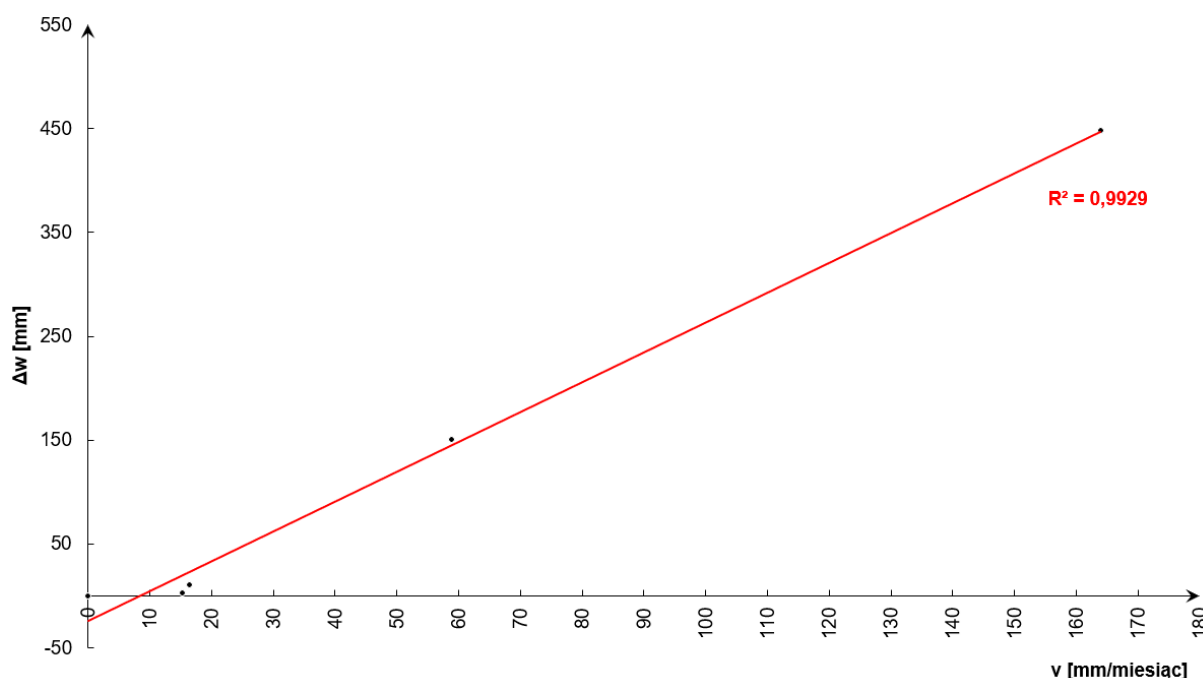
1. Pomiarów wykonywanych klasycznymi metodami geodezyjnymi (w przypadku gdy deformacje wyznaczone są dla eksploatacji historycznej, w obrębie której prowadzono pomiary geodezyjne).
2. Pomiarów wykonywanych klasycznymi metodami geodezyjnymi na sąsiednich polach eksploatacyjnych, w których prowadzono eksploatację w podobnych warunkach górnictwo – geologicznych.
3. Własnych doświadczeń związanych ze znajomością górotworu i eksploatacji.
4. Teorii prognozowania ruchów powierzchni Knothego - Budryka lub innych metod prognozowania deformacji w GZW.

W analizowanym przykładzie prędkość obniżania się powierzchni w miesięcznych interwałach określono dla punktu nr 82 (patrz rozdział 4.1.4.2, rys. 4.3) w oparciu o pomiary wykonane klasycznymi metodami geodezyjnymi (tab. 6.1).

**Tab. 6.1.** Średnia miesięczna prędkość obniżania się punktu nr 82, zlokalizowanego na linii pomiarowej wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu, w poszczególnych cyklach pomiarowych.

Reper nr 82	
Cykl pomiarowy	v [mm/miesiąc]
11.2020 – 02.2021	164
02.2021 – 05.2021	59
05.2021 – 08.2021	16
08.2021 – 11.2021	15

Kolejnym krokiem jest wyznaczenie zależności pomiędzy średnią miesięczną prędkością obniżania się powierzchni w poszczególnych cyklach pomiarowych, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS. W analizowany przypadku niedoszacowanie określono w oparciu o pomiary wykonane klasycznymi metodami geodezyjnymi (rys. 6.11).



**Rys. 6.11.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla punktu nr 82 zlokalizowanego na linii pomiarowej wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu (opracowanie własne).

Dla punktu nr 82 związek pomiędzy średnią miesięczną prędkością obniżania się powierzchni w poszczególnych cyklach pomiarowych, a niedoszacowaniem wyników SBAS do wyników geodezyjnych określa funkcja liniowa w postaci (6.1):

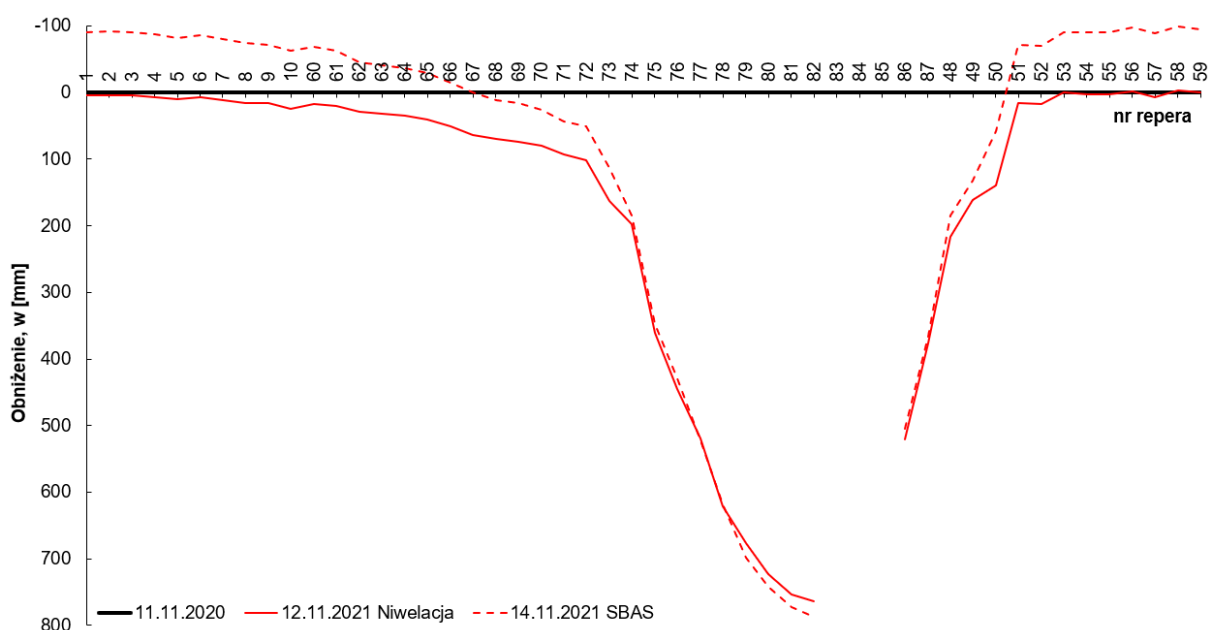
$$f(x) = 2,8701x - 23,786 \quad (6.1)$$

Współczynnik determinacji  $R^2$  wyniósł równo 0,9929, zatem można przyjąć, że dopasowanie jest bardzo dobre.

Kolejnymi dwoma krokami w określaniu dużych deformacji metodą zależności liniowych jest:

1. Oszacowanie błędów w wynikach SBAS na podstawie wyznaczonej zależności liniowej dla pozostałych punktów na linii pomiarowej lub, zważywszy na przestrzenny charakter interferometrii satelitarnej, dla pozostałych fragmentów niecki obniżeniowej.
2. Określenie nowych obniżzeń z uwzględnieniem oszacowanych błędów.

Uwzględniając powyższe punkty, oszacowano błędy wyników SBAS w oparciu o zależność (6.1) dla linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Warszawskiej w Bytomiu, a następnie określono nowe obniżenia, które wystąpiły na tej linii w okresie 11.2020 – 11.2021. Wyniki pokazano na rysunku 6.12.



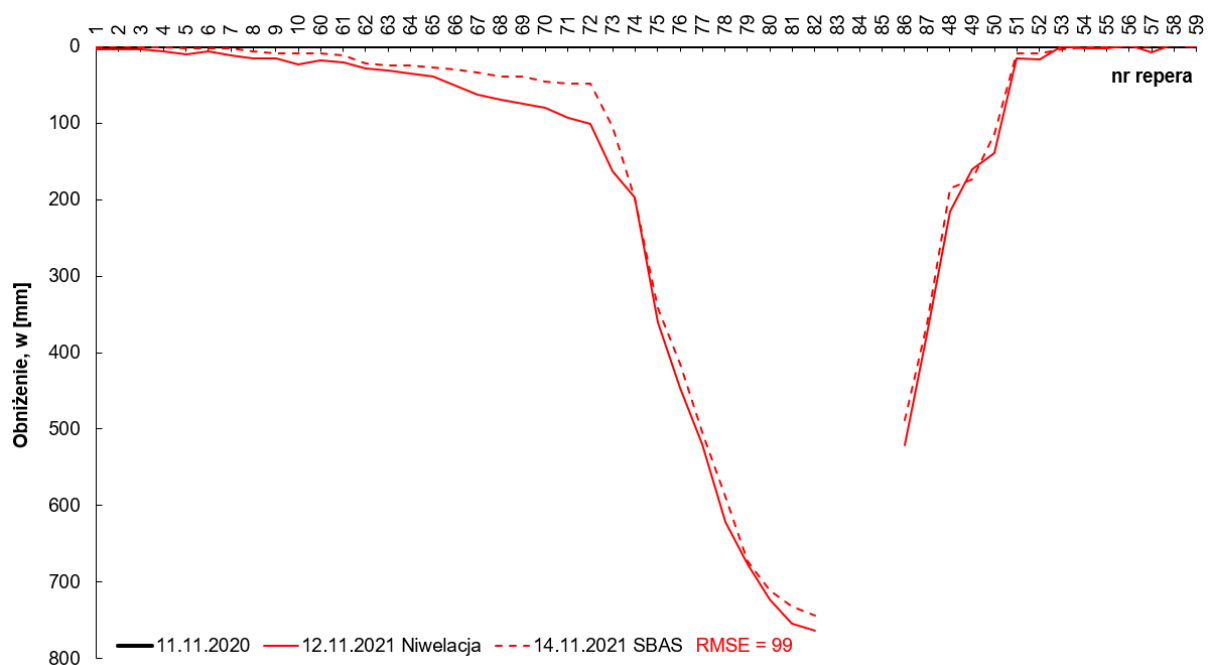
**Rys. 6.12.** Obniżenia powierzchni zmierzone w okresie 11.2020 – 11.2021, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu, zmierzone klasyczną niwelacją geodezyjną (linia ciągła) oraz wyznaczone z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS skorygowane metodą zależności liniowych (linia przerywana) (opracowanie własne).

Z wykresu (rys. 6.12) wynika, że możliwe jest skorygowanie wyników SBAS tak aby wyznaczyć duże obniżenia. Obniżenie w punkcie nr 82 zmierzone klasycznymi metodami geodezyjnymi w okresie 11.2020 – 11.2021 wyniosło 764 mm, a wyznaczone z przetwarzania obrazów metodą SBAS i skorygowane metodą zależności liniowych wyniosło 787 mm. Jednak na obrzeżach niecki występuje różnica, między porównywanymi wynikami, co związane jest w faktem, że w tych nie ma potrzeby stosowania metody korygującej. W związku z tym, kiedy takowe aplikujemy powielamy niepotrzebnie błąd. Zatem, pozostaje kwestia oszacowania, dla których fragmentów niecki obniżeniowej należy zastosować metodę korygującą zależności liniowych. Jest to możliwe na podstawie zależności między średnią



miesięczną prędkością obniżania się powierzchni w poszczególnych cyklach i niedoszacowania wyników SBAS do klasycznych pomiarów geodezyjnych (rys. 6.11). Z wykresu wynika, że błąd znacząco wzrasta dopiero gdy prędkość jest większa od około 20 mm/miesiąc. **Zatem metodę zależności liniowych należy zastosować dla wszystkich fragmentów niecki obniżeniowej, gdzie średnia miesięczna prędkość obniżania się powierzchni jest większa niż 20 mm/miesiąc.** Krok ten jest szczególnie ważny, gdyż musi być przeprowadzany ponownie indywidualnie, w zależności od rozpatrywanych przypadków i może znacząco wpływać na wyniki końcowe.

Uwzględniając powyższe rozważania, ponownie wyznaczono obniżenia wzdłuż linii pomiarowej zlokalizowanej na ul. Warszawskiej w Bieruniu metodą zależności liniowych (rys. 6.13).

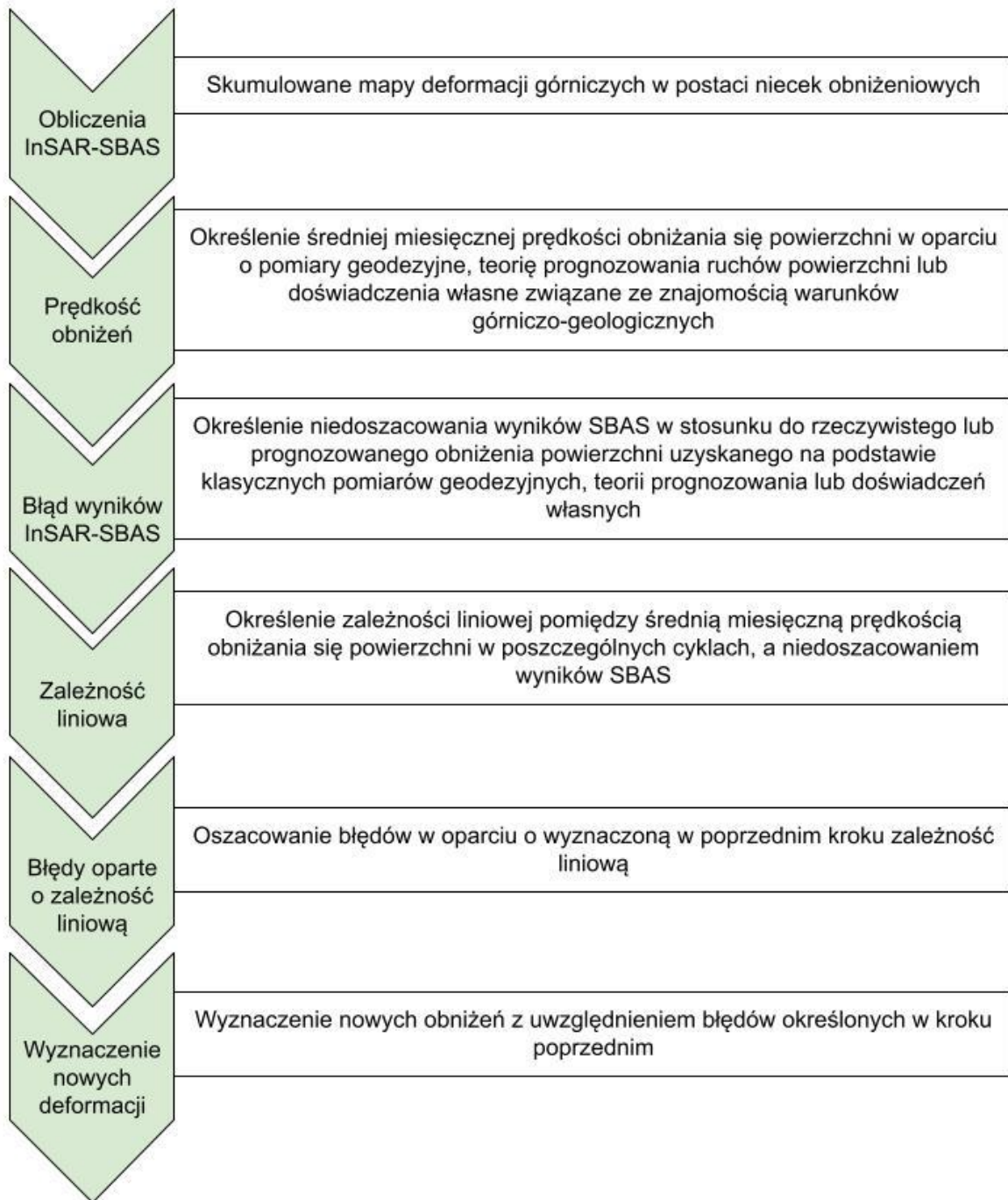


**Rys. 6.13.** Obniżenia powierzchni zmierzone w okresie 11.2020 – 11.2021, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu, zmierzone klasyczną niwelacją geodezyjną (linia ciągła) oraz ostateczne obniżenia wyznaczone z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS skorygowane metodą zależności liniowych (linia przerywana) (opracowanie własne).

Z wykresu (rys. 6.13) wynika, że stosując metodę zależności liniowych możliwe jest wyznaczenie dużych obniżeń z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS. Maksymalne obniżenie w punkcie nr 82 zmierzone klasycznymi metodami geodezyjnymi w okresie 11.2020 – 11.2021 wyniosło 764 mm, a wyznaczone z przetwarzania zobrażeń metodą SBAS i skorygowane metodą zależności liniowych wyniosło 744 mm. Różnica zatem wynosi tylko 20 mm. Dla porównania, różnica bez zastosowania metody zależności liniowych wynosiła 612

mm. RMSE w tym przypadku wyniósł 99 mm, przy początkowym równym 799 mm. Zatem udało się go obniżyć aż o 700 mm.

Opisaną metodę przedstawiono na rysunku 6.14.



**Rys. 6.14.** Diagram przedstawiający tok postępowania wyznaczania dużych deformacji w warunkach GZW metodą zależności liniowych (opracowanie własne).

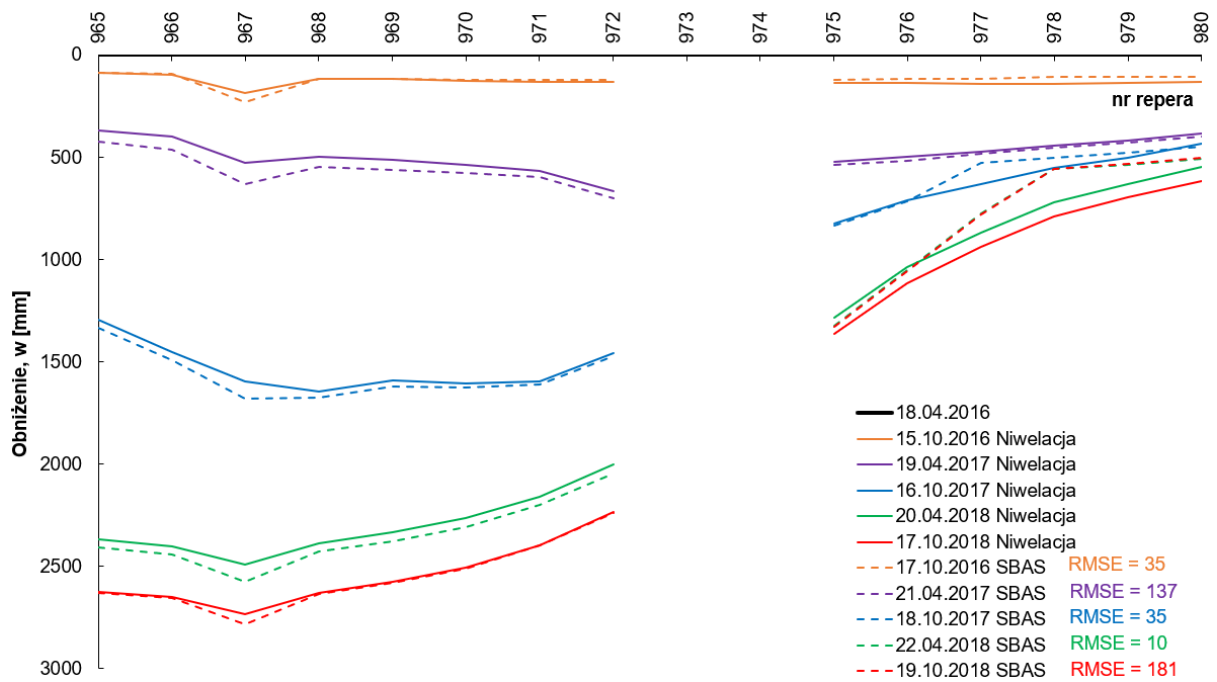
### 6.2.2. Walidacja metody zależności liniowych

Walidacje wyników otrzymanych z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS i skorygowanych metodą zależności liniowych przeprowadzono w oparciu o obniżenia

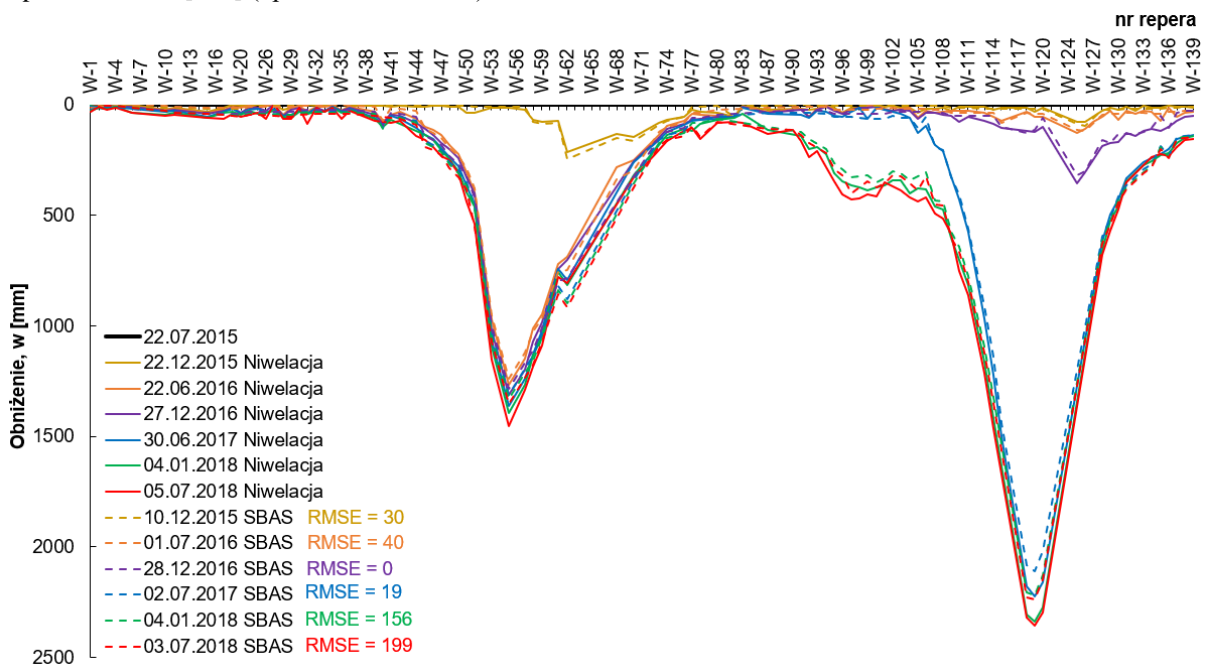
zmierzone na dwóch liniach zlokalizowanych na terenach górniczych KWK Bobrek – Piekary Ruch Bobrek oraz KWK ROW Ruch Marcel. W obu przypadkach deformacje spełniały kryterium dużych deformacji, zdefiniowane w rozdziale 1. Do walidacji włączono również linie pomiarową zlokalizowaną na terenie górniczym KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka, na której obniżenia osiągnęły II kategorię terenu górniczego ale w dłuższym okresie (2,5 roku). Ponadto, ocenę poprawności metody sprawdzono również na dwóch liniach zlokalizowanych na terenie górniczym KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast. Obniżenia, które na nich zmierzono nie osiągnęły II kategorii terenu górniczego ( $w_{1max} = 764$  mm,  $w_{2max} = 815$  mm w ciągu 1 roku), ale zanotowano na nich znaczący błąd równy odpowiednio 612 mm i 677 mm pomiędzy wynikami z pomiarów geodezyjnych, a wynikami z pomiarów metodą SBAS. W związku z tym dla tego typu obniżeń również konieczne jest stosowanie metody zależności liniowych.

Ocenę skuteczności metody wykonano przyjmując 2 kryteria, RMSE oraz różnice w największym obniżeniu w cyklu pomiarowym. Do walidacji nie włączono obniżeń zmierzonych na terenie górniczym zakładu górniczego EKO-PLUS Sp. z o. o. ponieważ, ich wartość mieściła się w dolnej granicy I kategorii terenu górniczego ( $w_{max} = 399$  mm), a różnice pomiędzy wynikami geodezyjnymi, a wynikami z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS były stosunkowo niewielkie (patrz rozdział 5.1.4, rys. 5.9 – 5.14), co znalazło swoje potwierdzenie w RMSE (patrz rozdział 5.1.4, tab. 5.1). Z walidacji wyłączono również obniżenia zmierzonych na terenie górniczym KWK Ruda Ruch Pokój, gdyż istnieje kilka trendów i zastosowanie metody wymagałoby podziału linii pomiarowej na krótsze odcinki lub podziału okresu pomiarowego na mniejsze podokresy i dostosowanie ich do przebiegu eksploatacji. Będzie to przedmiotem kolejnych badań z wykorzystaniem zróżnicowanej dynamiki narastania obniżeń dla różnych prędkości eksploatacji frontami ścianowymi.

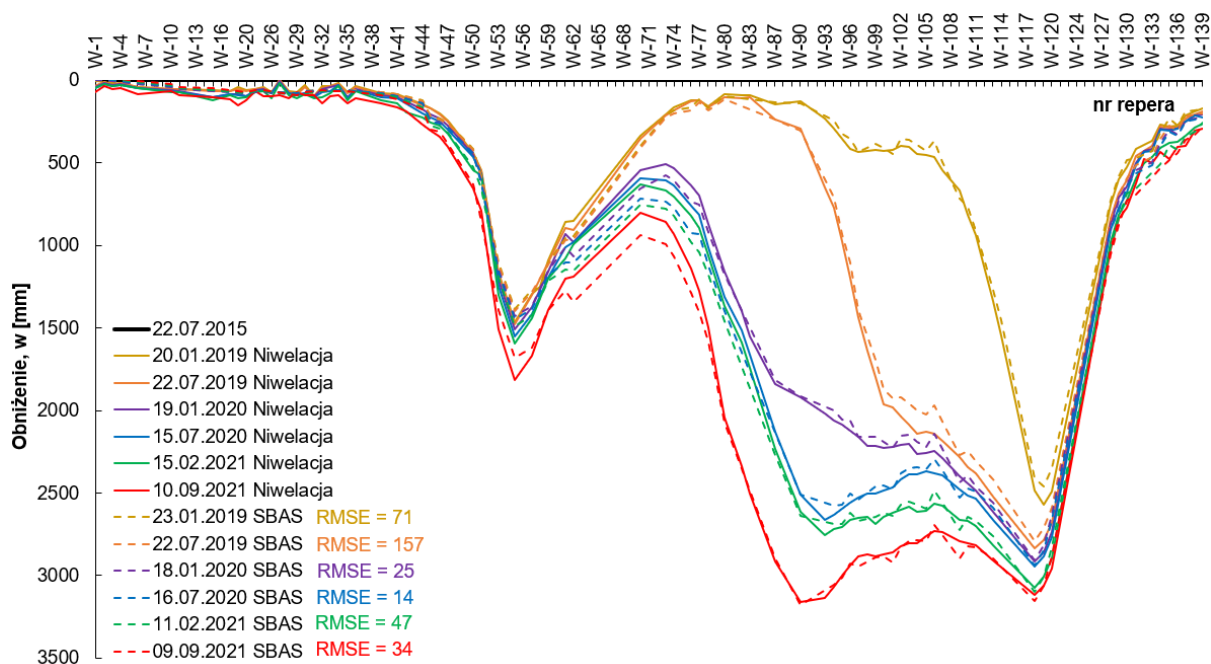
Reasumując, walidację przeprowadzono w oparciu o 5 linii pomiarowych zlokalizowanych na 4 terenach górniczych, które składały się łącznie z 260 punktów, na których wykonano 30 cykli pomiarowych. Dla każdego przypadku w pierwszej kolejności wyznaczono trend wzrostu niedoszacowania wyników uzyskanych z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS do wzrostu średniej miesięcznej prędkości obniżania się powierzchni w poszczególnych cyklach pomiarowych. Trend oszacowano w oparciu o obniżenia zmierzone na jednym z punktów pomiarowych dla każdej linii. Następnie, metodą zależności liniowych oszacowano błędy pomiaru i skorygowano obniżenia otrzymane metodą SBAS. Wyniki analizy przedstawiono na kolejnych wykresach (rys. 6.15 – 6.20). Dla porządku, wyniki z KWK ROW Ruch Marcel rozdzielono na 2 wykresy, ze względu na dużą ilość cykli pomiarowych i zaciemnienie rysunku (rys. 6.16, 6.17).



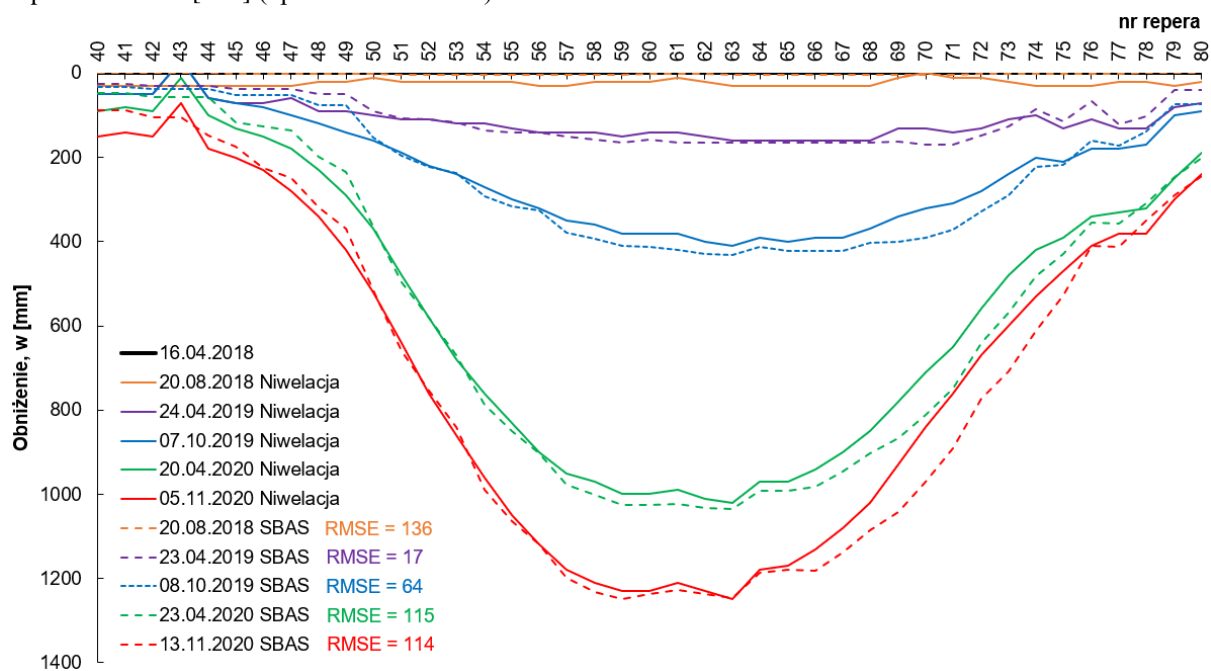
**Rys. 6.15.** Porównanie obniżenia powierzchni zmierzonego klasycznymi metodami geodezyjnymi (linie ciągłe) z obniżeniem uzyskanym z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS skorygowanym metodą zależności liniowych (linie przerywane) w poszczególnych cyklach pomiarowych, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Bobrek – Piekary Ruch Bobrek wzdłuż ul. Karbowskiej w Bytomiu; różnice wyrażono w postaci RMSE [mm] (opracowanie własne).



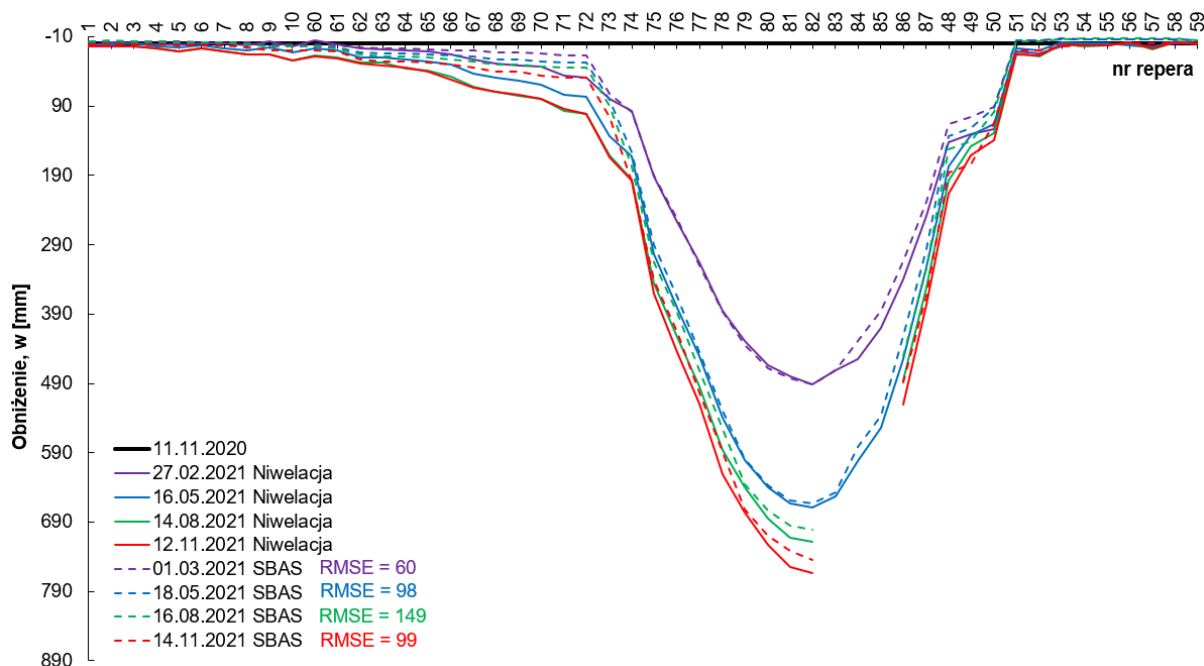
**Rys. 6.16.** Porównanie obniżenia powierzchni zmierzonego klasycznymi metodami geodezyjnymi (linie ciągłe) z obniżeniem uzyskanym z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS skorygowanym metodą zależności liniowych (linie przerywane) w okresie 07.2015 – 07.2018, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK ROW Ruch Marcel wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach - część I; różnice wyrażono w postaci RMSE [mm] (opracowanie własne).



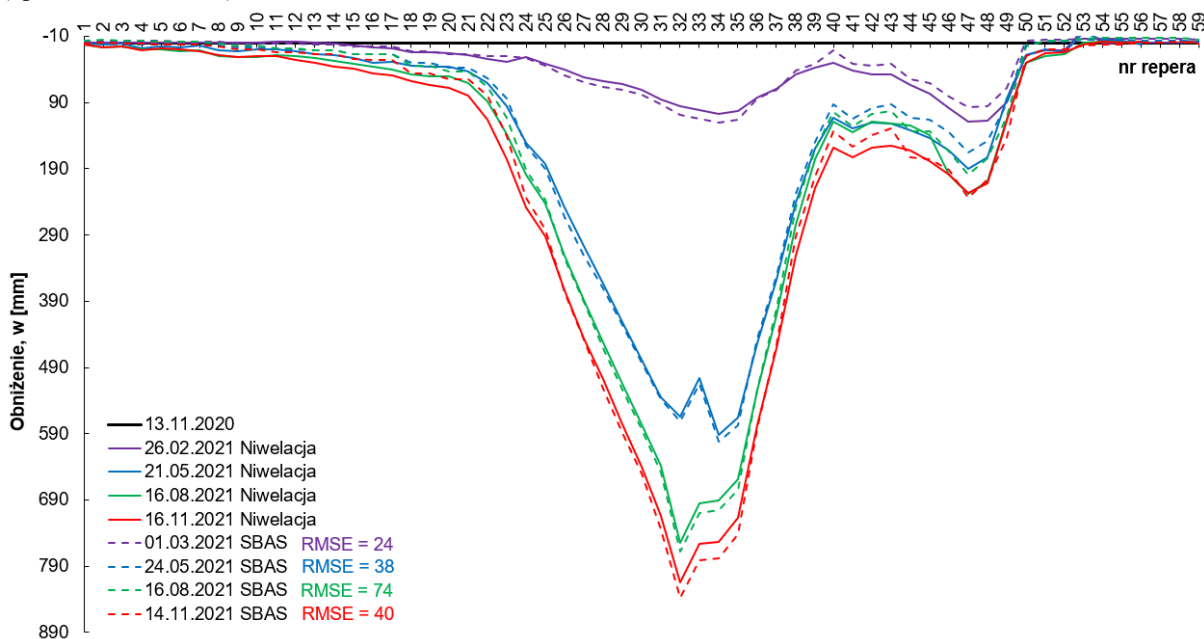
**Rys. 6.17.** Porównanie obniżenia powierzchni zmierzonego klasycznymi metodami geodezyjnymi (linie ciągłe) z obniżeniem uzyskanym z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS skorygowanym metodą zależności liniowych (linie przerywane) w okresie 07.2015 – 09.2021, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK ROW Ruch Marcel wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach - część II; różnice wyrażono w postaci RMSE [mm] (opracowanie własne).



**Rys. 6.18.** Porównanie obniżenia powierzchni zmierzonego klasycznymi metodami geodezyjnymi (linie ciągłe) z obniżeniem uzyskanym z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS skorygowanym metodą zależności liniowych (linie przerywane) w poszczególnych cyklach pomiarowych, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka wzdłuż ul. Pszczyńskiej w Jastrzębiu Zdroju; różnice wyrażono w postaci RMSE [mm] (opracowanie własne).



**Rys. 6.19.** Porównanie obniżenia powierzchni zmierzonego klasycznymi metodami geodezyjnymi (linie ciągłe) z obniżeniem uzyskanym z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS skorygowanym metodą zależności liniowych (linie przerywane) w poszczególnych cyklach, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu; różnice wyrażono w postaci RMSE [mm] (opracowanie własne).



**Rys. 6.20.** Porównanie obniżenia powierzchni zmierzonego klasycznymi metodami geodezyjnymi (linie ciągłe) z obniżeniem uzyskanym z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS skorygowanym metodą zależności liniowych (linie przerywane) w poszczególnych cyklach, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast wzdłuż ul. Węglowej w Bieruniu; różnice wyrażono w postaci RMSE [mm] (opracowanie własne).

Porównując wykresy (rys. 6.15 – 6.20) z wykresami pokazanymi na rysunkach 5.5 – 5.22 w rozdziale 5.1.4, które przedstawiają porównanie wyników klasycznych pomiarów

geodezyjnych z wynikami otrzymanymi z samego przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS, bez zastosowania metody zależności liniowych, od razu widać dużą różnicę w dopasowaniu wyników. Po zastosowaniu metody zależności liniowych wartości RMSE dla wszystkich analizowanych cykli pomiarowych mieszczą się w przedziale 0 – 199 mm, a różnice w obniżeniu maksymalnym -86 – +121 mm. Szczegółowe wyniki walidacji metody zależności liniowych przedstawiono w tabeli 6.2.

**Tab. 6.2.** Wartości RMSE oraz różnice w obniżeniu maksymalnym dla poszczególnych cykli pomiarowy wraz ze średnimi wartościami dla poszczególnych linii pomiarowych pomiędzy wynikami obniżeń otrzymanymi z pomiarów wykonanych klasycznymi metodami geodezyjnymi oraz z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS skorygowane metodą zależności liniowych.

Linia pomiarowa	Cykl pomiarowy	RMSE [mm]	RMSE <sub>sr</sub> [mm]	$\Delta w_{max}$ [mm]	$\Delta w_{maxsr}$ [mm]	$ \Delta w_{maxsr} $ [mm]
KWK Bobrek – Piekary Ruch Bobrek, ul. Karbowska, Bytom	10.2016	35	80	-41	-47	47
	04.2017	137		-31		
	10.2017	35		-29		
	04.2018	10		-86		
	10.2018	181		-49		
KWK ROW Ruch Marcel, ul Wyzwolenia, Marklowice	12.2015	30	66	-30	42	42
	07.2016	40		25		
	12.2016	0		29		
	07.2017	19		115		
	01.2018	156		121		
	07.2018	199		121		
	01.2019	71		111		
	07.2019	157		41		
	01.2020	25		6		
	07.2020	14		6		
	02.2021	47		-29		
09.2021	34	-18				
KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka, ul. Pszczyńska, Jastrzębie Zdrój	08.2018	136	89	29	-2	2
	04.2019	17		-4		
	10.2019	64		-21		
	04.2020	115		-16		
	11.2020	114		3		
KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast, ul Warszawska, Bieruń	03.2021	60	102	2	46	46
	05.2021	98		7		
	08.2021	149		17		
	11.2021	99		20		
KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast, ul. Węgłowa, Bieruń	03.2021	24	44	21	-6	6
	05.2021	38		-10		
	08.2021	74		-14		
	11.2021	40		-23		

Z tabeli 6.2 wynika, że po zastosowaniu metody zależności liniowych największy RMSE wyniósł 199 mm i miał miejsce dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górnym KWK ROW Ruch Marcel dla cyklu pomiarowego wykonanego w lipcu 2018 roku. Różnica w obniżeniu maksymalnym w tym cyklu pomiarowym wyniosła 121 mm (największa różnica ze wszystkich cykli pomiarowych). Nie mniej jednak jest to skrajne, najmniej dokładne dopasowanie. Pozostałe wartości RMSE nie przekroczyły 181 mm dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górnym KWK Bobrek – Piekary Ruch Bobrek, dla ostatniego cyklu pomiarowego wykonanego w październiku 2018 r. Większość RMSE kształtowała się natomiast na poziomie poniżej 100 mm, a najmniejszy z nich wyniósł 0 mm, również dla linii zlokalizowanej na terenie górnym KWK ROW Ruch Marcel, dla cyklu pomiarowego wykonanego w grudniu 2016 roku. Różnica w obniżeniu maksymalnym dla tego cyklu wyniosła 29 mm. Obliczono również jedną średnią wartość RMSE dla wszystkich cykli pomiarowych wykonanych na danej linii pomiarowej. Największy miał miejsce na linii zlokalizowanej wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu, 102 mm, a najmniejszy na linii wzdłuż ul. Węglowej w Bieruniu, 44 mm. Najmniejsza różnica w obniżeniu maksymalnym w danym cyklu wyniosła tylko 2 mm i miała miejsce dla cyklu pomiarowego wykonanego w marcu 2021 roku na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu. Ponadto, obliczono również średnią różnicę w obniżeniu maksymalnym ze wszystkich cykli pomiarowych na danej linii pomiarowej, a następnie moduł z otrzymanej wartości w celu uzyskania różnicy w jednostkach dodatnich. Największa średnia różnica wyniosła 47 mm dla linii pomiarowej zlokalizowanej w Bytomiu, a najmniejsza tylko 2 mm dla linii pomiarowej zlokalizowanej w Jastrzębiu Zdroju.

Dla porównania uzyskanych rezultatów metodą zależności liniowych, do wyników otrzymanych z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS bez skorygowania ich metodą zależności liniowych, wartości RMSE dla ostatnich cykli pomiarowych, odnoszące się do pomiarów geodezyjnych zestawiono w tabeli 6.3.



**Tab. 6.3.** Porównanie wartości RMSE dla ostatnich cykli pomiarowych, obliczonych dla wyników otrzymanych z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS bez korygowania metodą zależności liniowych i z korygowaniem metodą zależności liniowych, odniesione do wyników z klasycznych pomiarów geodezyjnych.

L.p.	Kopalnia	Linia pomiarowa	RMSE [mm]	
			SBAS	SBAS + metoda zależności liniowych
1	KWK Bobrek – Piekary Ruch Bobrek	Bytom ul. Karbowska	5657	181
2	KWK ROW Ruch Marcel	Marklowice ul. Wyzwolenia	8823	34
3	KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka	Jastrzębie Zdrój ul. Pszczyńska	3027	114
4	KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast	Bieruń ul. Warszawska	799	99
5	KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast	Bieruń ul. Węglowa	1057	40
		Średnia [mm]	3873	94

Jak wynika z tabeli 6.3, zastosowanie metody zależności liniowych pozwoliło na zmniejszenie RMSE z poziomu kilkumetrowego do akceptowalnego poziomu kilku lub kilkunastu centymetrów.

### 6.3. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionej analizy można stwierdzić, że możliwe jest wykrywanie dużych deformacji metodami interferometrii satelitarnej, co potwierdzono wynikami analiz w niniejszym rozdziale. W pierwszej kolejności przeanalizowano zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a niedoszacowaniem wyników otrzymanych z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS, względem klasycznych metod geodezyjnych. Wykazano, że wzrost niedoszacowania jest wprost proporcjonalny do wzrostu prędkości obniżania się powierzchni terenu.

Na podstawie związku prędkości obniżania się powierzchni do niedoszacowania wyników SBAS opracowano i przedstawiono metodę zależności liniowych, która pozwala wykrywać duże deformacje z wykorzystaniem interferometrii satelitarnej. Walidację metody przeprowadzono w oparciu o klasyczne pomiary geodezyjne wykonywane w 30 cyklach pomiarowych na 5 liniach pomiarowych zlokalizowanych na terenach górniczych 4 zakładów górniczych, składających się z 260 punktów. Dla wszystkich cykli pomiarowych wartości RMSE kształtowały się w przedziale od 0 do 199 mm, a różnice pomiędzy maksymalnymi obniżeniami w poszczególnych cyklach pomiarowych mieściły się w przedziale od -86 do +121 mm (tab. 6.2).

Hybrydowe podejście SBAS + zależność liniowa może być z powodzeniem stosowane w GZW z dokładnością do kilkunastu centymetrów. Metoda zależności liniowych w dużej mierze opiera się na znajomości warunków górniczo – geologicznych i oszacowania przyszłej średniej miesięcznej prędkości obniżania się powierzchni. Do walidacji, prędkość oszacowano na podstawie obniżania się jednego punktu.

Powiększenie wiedzy dotyczącej opisu prędkości narastania obniżeń, w krótszym okresie niż jeden miesiąc, a także rozszerzenie w przestrzeni, o kolejne sąsiadujące ze sobą punkty, może prowadzić do zwiększenia dokładności metody. Metoda nie została przetestowana w oparciu o inne metody przetwarzania zobrażeń SAR takie jak DInSAR lub PSInSAR. W tym zakresie planowane jest prowadzenie przez Autora dalszych badań.

## 7. Określenie zasięgu deformacji górniczych

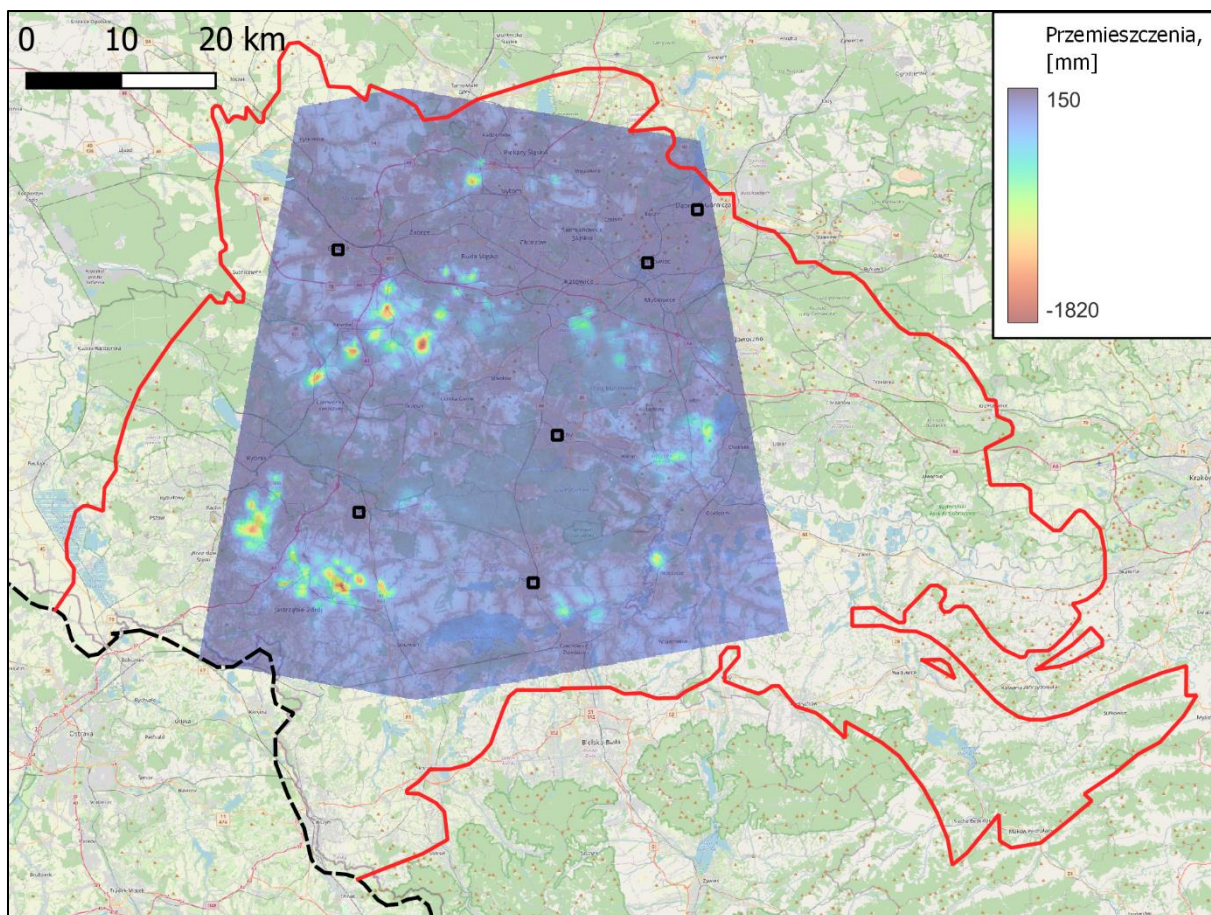
### 7.1. Opis metodyki wykorzystanej do określenia zasięgu deformacji górniczych

#### 7.1.1. Określenie błędu otrzymanych wyników obniżeń.

Do określenia zasięgu deformacji górniczych wykorzystano wyniki, pionowych obniżeń powierzchni, otrzymane z przetwarzania zobrazowań SAR metodą SBAS (patrz rozdział 5.1). Metodykę, którą wykorzystano do określenia zasięgu przedstawiono na jednym przykładzie demonstracyjnym, kopalni Piast-Ziemowit Ruch Piast, eksploatacji ściany 373a w pokładzie 209 w warstwie II. Wykorzystane dane geologiczno-górnice szczegółowo opisano w rozdziale 4.1.4.2.

Każdy pomiar obarczony jest błędami, podobnie jest w przypadku pomiarów wykonywanych metodami InSAR. Aby wyznaczyć błąd z jakim zostały obliczone skumulowane obniżenia metodą SBAS wytypowano 6 obszarów porównawczych o wymiarach 1 km<sup>2</sup> każdy. Obszary wybrano w oparciu o 2 kryteria. Pierwszym z nich była koherencja zobrazowań satelitarnych. Jest ona miarą jakości dopasowania dwóch zobrazowań SAR, a w związku z tym również miarą wiarygodności otrzymanych wyników. Wysokie wartości koherencji obserwowane są z reguły w terenach silnie zurbanizowanych ze względu na stabilność podłoża i dobrą jakość odbicia sygnału. Przyjęto zatem, że do celów porównawczych powinny być wybrane centra miast, ponieważ będą charakteryzować się wysokimi wartościami koherencji. Drugim kryterium było dobranie obszarów, w których nie prowadzono eksploatacji górniczej. W tym celu przeanalizowano lokalizację terenów górniczych w GZW oraz eksploatację dokonaną od 2015 r. W oparciu o opisane kryteria, do celów porównawczych wytypowano centra miast Gliwic, Sosnowca, Dąbrowy Górniczej, Tychów, Żor i Pszczyny (rys. 7.1).

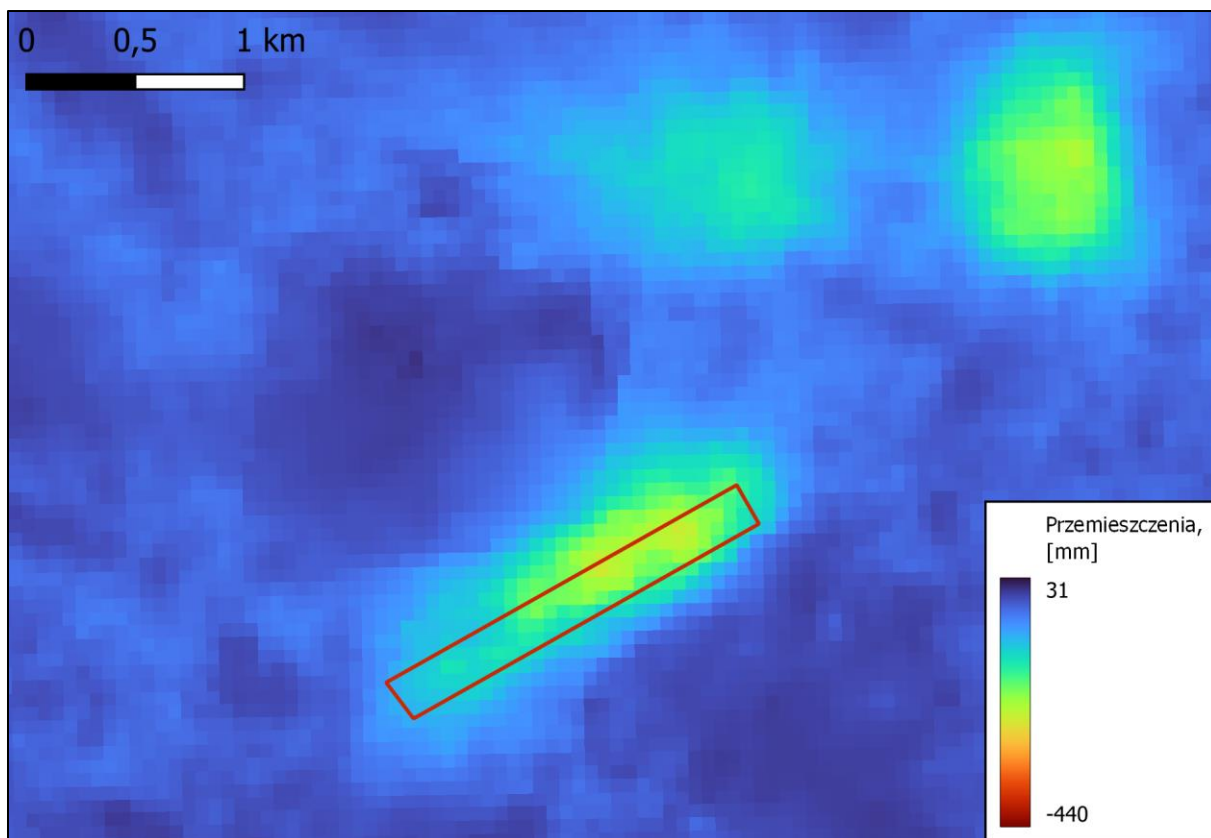
Eksploatacja w analizowanym przykładzie była prowadzona w okresie 01.06.2020 – 01.11.2021 r. Dla tego okresu została obliczona średnia wartości pionowego ruchu powierzchni z 6 zdefiniowanych obszarów porównawczych, która wyniosła +13 mm. Ze względów na brak działalności górniczej w tych rejonach wartość ta powinna wynosić 0. Można zatem przyjąć, że błąd wyznaczonych obniżeń metodą SBAS jest równy  $\pm 13$  mm.



**Rys. 7.1.** Lokalizacja wytypowany obszarów porównawczych (czarne kontury) w granicy GZW (czerwona linia) na tle mapy przedstawiającej pionowe przemieszczenia powierzchni w okresie 07.03.2015 – 13.03.2022 wyznaczone metodą SBAS – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).

### 7.1.2. Korygowanie asymetrii wpływów względem pola eksploatacyjnego

Na rysunku 7.2 przedstawiono obniżenia powierzchni wyznaczone metodą SBAS, które zostały spowodowane eksploatacją ściany 373a w terenie górniczym KWK Piast-Ziemowit, w okresie od czerwca 2020 roku do listopada 2021 roku.



**Rys. 7.2.** Mapa pionowych przemieszczeń powierzchni wyznaczonych metodą SBAS, spowodowanych eksploatacją górniczą ściany 373a w pokładzie 209 w. II (czerwony kontur) w okresie 06.2020 – 11.2021 (opracowanie własne).

Z rysunku 7.2 wynika, że niecka obniżeniowa jest przesunięta względem konturów ściany eksploatacyjnej. Wpływ na to mają dwa czynniki. Pierwszym z nich jest zjawisko asymetrii wpływów w stosunku do eksploatowanego pola, a więc ich przesunięcia ze względu na nachylenie pokładu w kierunku jego upadu. Wartość tego przesunięcia określa zależność (Popiołek 2009):

$$p = H_k \times \operatorname{tg}(k \times \alpha) \quad (7.1)$$

gdzie:

$H_k$  – miąższość warstw karbońskich; głębokość eksploatowanego pola,

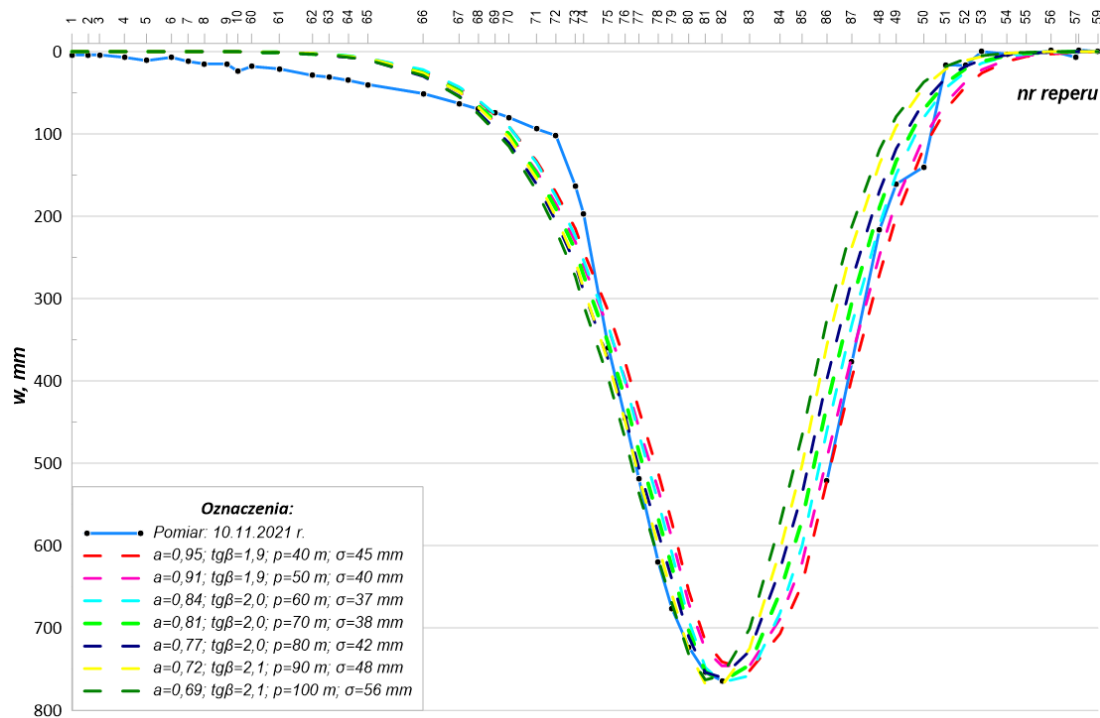
$\alpha$  – nachylenie pokładu,

$k$  – współczynnik dewiacji wpływów wynoszący 0,7 dla pokładów nachylonych do  $10^\circ$ .

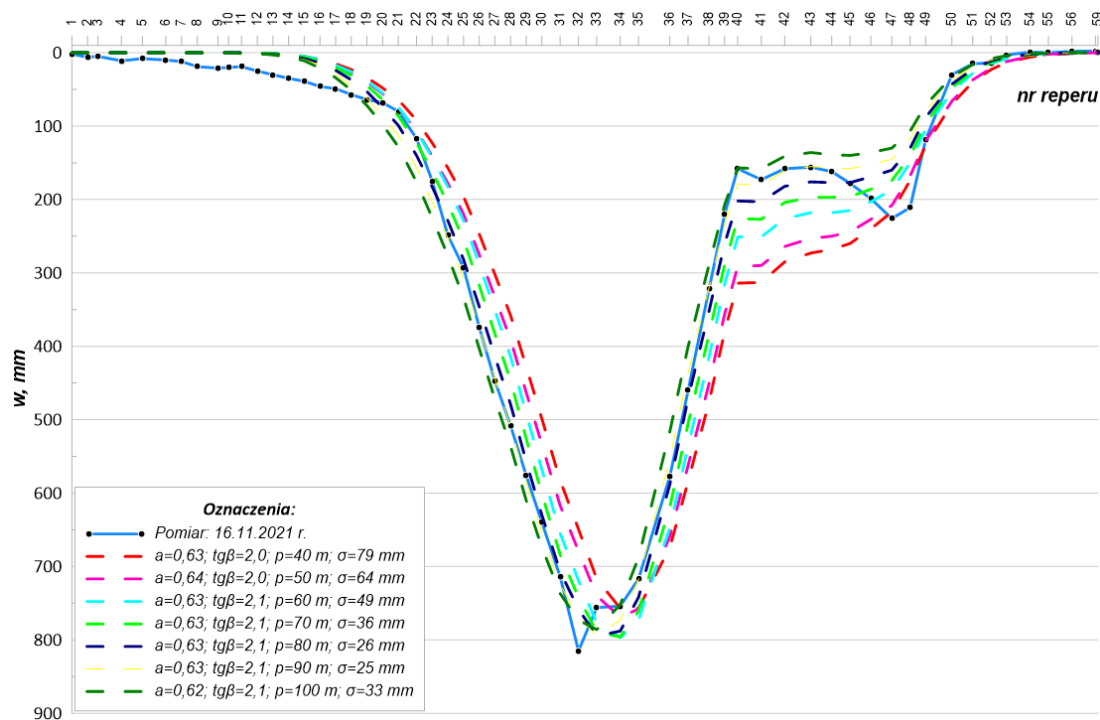
Według zależności (7.1) przesunięcie wpływów ze względu na nachylenie pokładu dla analizowanego przykładu wynosi 43 m w kierunku upadu pokładu.

Drugim czynnikiem jest obrzeżę eksploatacyjne, które dla GZW średnio wynosi  $0,1H$ , gdzie  $H$  oznacza głębokość eksploatowanego pokładu (Kowalski 2015). Dla analizowanego przypadku parametr obrzeża został wyznaczony na podstawie pomiarów obniżenia

wykonywanych metodą niwelacji technicznej na dwóch liniach pomiarowych. Obrzeżę określono metodą kolejnych przybliżeń przy założonych różnych kombinacjach parametrów, z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów. Proces ten jest kalibracją modelu obliczeniowego. Wyniki najlepszego dopasowania pokazano na rysunku 7.3 i 7.4.



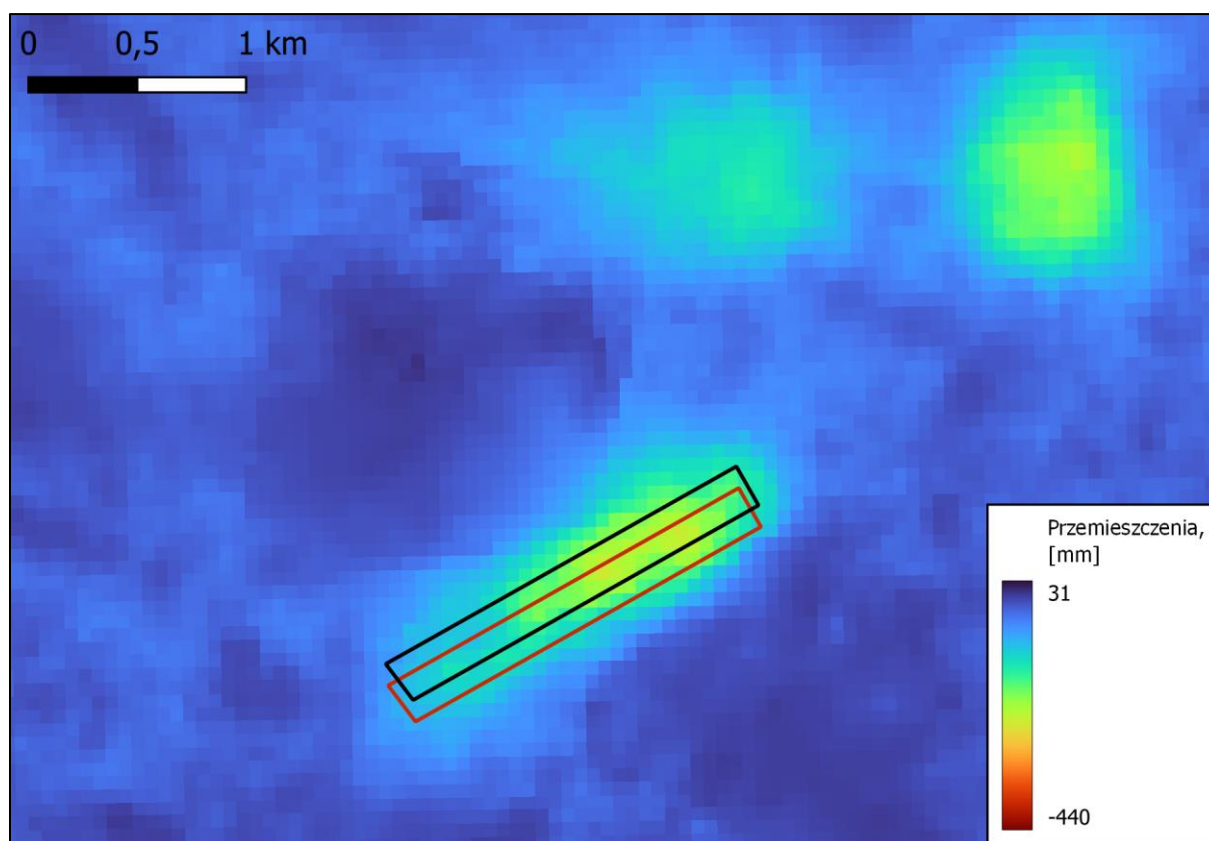
**Rys. 7.3.** Wyniki dopasowania modelu do obniżenia pomierzonego na pierwszej linii pomiarowej (Dokumentacja GIG 2022).



**Rys. 7.4.** Wyniki dopasowania modelu do obniżenia pomierzonego na drugiej linii pomiarowej (Dokumentacja GIG 2022)

Z dopasowania (rys. 7.3, 7.4) wynika, że obrzeże eksploatacyjne dla ściany 373a wyniosło 90 – 100 m, przyjęto zatem 95 m, a więc  $0,12H$ , przy czym obrzeże było w części południowej przesunięte do środka frontu ściany 373a, a od strony północnej na północ (tak zwane antyobrzeże). Powodowane jest to wcześniejszą, sąsiednią eksploatacją ściany 372 w pokładzie 209 w latach 2012 – 2014, zlokalizowanej na północ od analizowanej ściany 373a.

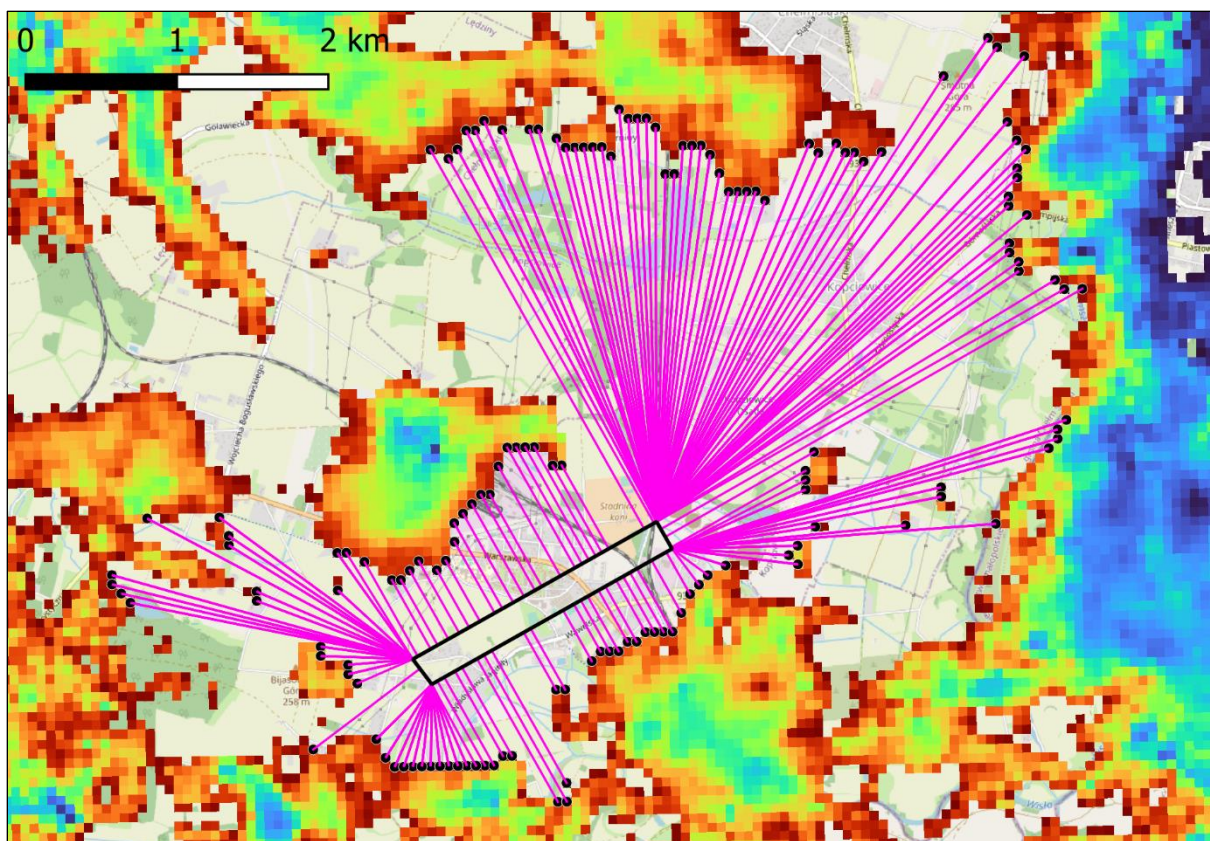
Aby móc określić średni zasięg deformacji dla ściany 373a w pierwszej kolejności należało skorygować położenie niecki obniżeniowej względem pola eksploatacyjnego o wpływ nachylenia pokładu oraz obrzeże eksploatacyjne. Rezultat przedstawiono na rysunku 7.5.



**Rys. 7.5.** Lokalizacja ściany 373a w pokładzie 209 warstwa II przed skorygowaniem niecki obniżeniowej (kolor czerwony) oraz po skorygowaniu niecki obniżeniowej (kolor czarny) ze względu na nachylenie pokładu oraz obrzeże eksploatacyjne na tle obniżeń wyznaczonych metodą SBAS (opracowanie własne).

### 7.1.3. Pierwsza filtracja danych

W celu określenia zasięgu deformacji uwzględniono piksele, których wartość mieściła się w przedziale błędu opisanego w rozdziale 7.1.1, i które znajdowały się najbliżej analizowanego pola eksploatacyjnego. Pomiar zasięgu prowadzono prostopadłe do ściany lub, gdy pomiar prostopadły nie był możliwy, do najbliższego miejsca krawędzi eksploatacyjnej. W analizowanym przykładzie zidentyfikowano 150 pikseli spełniających powyższe kryteria. Zasięg ściany eksploatacyjnej 373a KWK Piast-Ziemowit przedstawiono na rysunku 7.6.



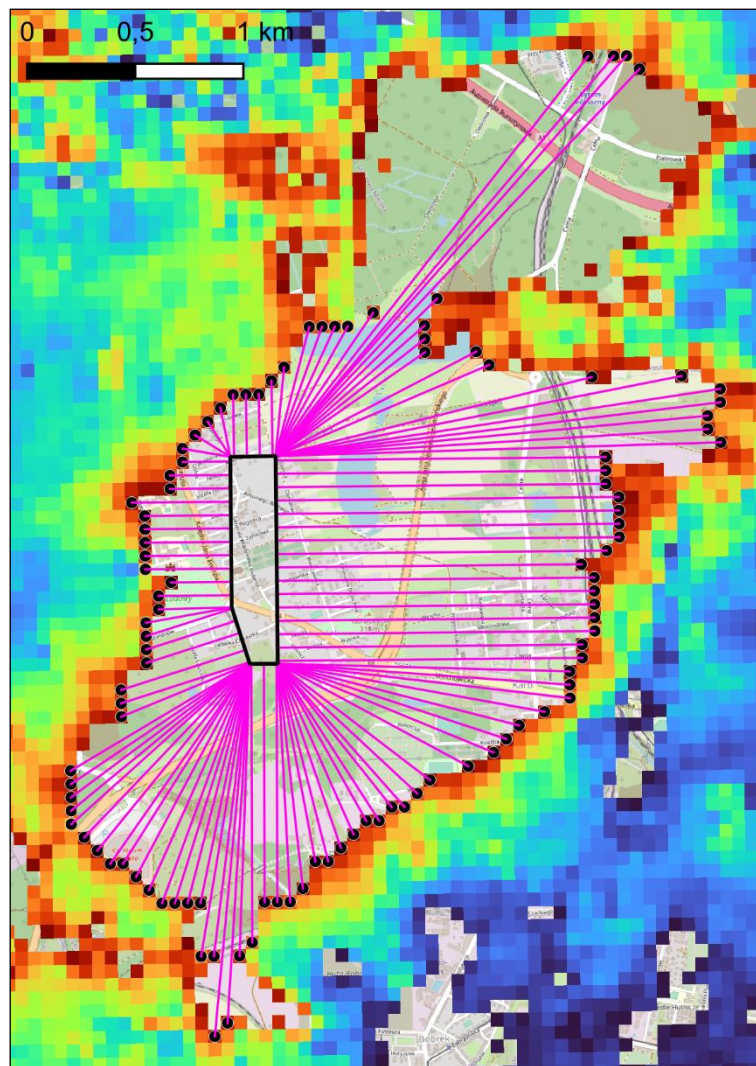
**Rys. 7.6.** Piksele (czarne punkty) demonstrujące zasięg niecki obniżeniowej powstałej na skutek eksploatacji ściany 373a (linia czarna) KWK Piast - Ziemowit wraz z liniami demonstrującymi kierunek pomiaru zasięgu od piksela do ściany eksploatacyjnej (linia fioletowe) – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).

W północno-wschodniej część analizowanego przykładu widać wyraźny wzrost zasięgu niecki obniżeniowej (rys. 7.6). Wynika to z prowadzonej w analogicznym okresie sąsiedniej eksploatacji. Na północny-wschód od analizowanej ściany 373a zlokalizowane są dwie niewielkie niecki obniżeniowe, które są tego potwierdzeniem (rys. 7.2 i 7.5). Obecne badania prowadzone są w warunkach większych lub mniejszych ruchów powierzchni, których nie sposób uwzględnić w analizach. Trudno jest również dysponować wiedzą na temat każdej obecnie eksploatowanej ściany przez wszystkie kopalnie węgla kamiennego. Znajduje to również potwierdzenie w liczbach, ponieważ średni zasięg wyniósł  $2,02H$ , gdzie  $H$  to średnia głębokość ściany 373a, a odchylenie standardowe próby  $1,54H$ . Metoda InSAR, jako zastosowana technika pomiarowa, również nie daje możliwości odseparowania sygnału dla jednego pola eksploatacyjnego. Możliwe jest ograniczenie przestrzenne, ale nie można z niego skorzystać w momencie, gdy eksploatacja prowadzona jest w bliskim sąsiedztwie.

Złożoność problemu potwierdza także przykład z KWK Bobrek – Piekary, który dotyczy eksploatacji ściany 6, w pokładzie 503, w okresie 01.09.2016 – 01.02.2018 (rys. 7.7). Zasięg niecki obniżeniowej od strony zachodniej jest mały i wynosi około 400 m czyli  $0,59H$  ( $H = 681$  m). Jest to jednak wartość wiarygodna, gdyż zachodnia krawędź eksploatacyjna jest



zlokalizowana w rejonie calizny, strefy uskokowej. Wyznaczony dla tej parceli parametr górotworu  $tg\beta$  wynosi około 2,4 (Apanowicz i in. 2022). Od strony wschodniej natomiast zasięg niecki jest równy około 1500 m, czyli  $2,20H$ . Ponownie, jak w przypadku przykładu z KWK Piast – Ziemowit, ma to związek z sąsiednią eksploatacją. Średni zasięg niecki obniżeniowej dla wszystkich analizowanych pikseli, których zidentyfikowano 109, wyniósł  $1,55H$ , a odchylenie standardowe  $0,81H$ .



**Rys. 7.7.** Piksele (czarne punkty) demonstrujące zasięg niecki obniżeniowej powstałej na skutek eksploatacji ściany 6 (linia czarna) KWK Bobrek - Piekary wraz z liniami demonstrującymi kierunek pomiaru zasięgu od piksela do ściany eksploatacyjnej (linie fioletowe) – układ PL2000/6, EPSG:2177.

Z uwagi na cel badań, którym jest wyznaczenie średniego zasięgu deformacji górniczych występujących w GZW konieczne jest uwzględnienie wielu przykładów o zróżnicowanych warunkach górniczo-geologicznych. W związku z tym nie należy odrzucać opisanego przykładu z KWK Bobrek – Piekary ze względu na specyfikę parametru górotworu, a co za tym idzie niewielkiego zasięgu deformacji. Nie mniej jednak ze względu na przedstawioną złożoność problemu oraz brak wiedzy co do sąsiednich eksploatacji i ruchów

nimi wywołanych, konieczne było wprowadzenie do analizy kryterium, które uwiarygodniło próbę, na podstawie której wyznaczono średni zasięg deformacji w GZW. Założono, że wiarygodny zasięg wpływów mieścić się powinien w przedziale  $0,75H - 2H$  i do dalszej analizy brano pod uwagę piksele, których odległość od pola eksploatacyjnego mieściła się w tym zakresie. Dolna wartość została określona w oparciu o ugruntowaną w Polskim górnictwie, teorię ruchów górotworu Knothe – Budryka (Knothe 1984), w której obniżenia występują do granicy równej  $1,5r$ , gdzie  $r$  jest to promień zasięgu wpływów głównych, co po przekształceniu można zapisać jako (7.2):

$$L = 1,5r = 1,5 \frac{H}{\operatorname{tg}\beta} = 0,75H \quad (7.2)$$

gdzie:

$\operatorname{tg}\beta$  - parametr górotworu równy 2,0 – średnia wartość dla GZW wyznaczona przez Kowalskiego (2015)

Przyjęto, że w odległości mniejszej niż  $0,75H$  od krawędzi eksploatacyjnej, występują deformacje górnicze. Górna granica jest kompromisem określonym na podstawie praktycznej wiedzy pozyskanej z literatury naukowej. Doświadczenia z GZW wskazują, że granica wpływów może znajdować się w odległości równej głębokości eksploatacji  $L = H$  lub trzykrotnie większej  $L = 3H$ . W związku z tym przyjęto wartość środkową równą  $2H$ . Zarówno teoria Knothe – Budryka, jak i dokładny przegląd literatury pod kątem zasięgu deformacji górniczych przedstawiono w rozdziale 3.1.

Wprowadzenie do badań opisanego kryterium pozwoliło na wyeliminowanie z próby pikseli obarczonych błędami ze względu na czynniki zewnętrzne (sąsiednia eksploatacja) oraz odrzucenie przypadków skrajnych charakterystycznych dla małych lokalnych pól eksploatacyjnych (opisany wcześniej przypadek KWK Bobrek – Piekary).

#### 7.1.4. Druga filtracja danych kolejnymi przybliżeniami

W celu obliczenia średniego zasięgu deformacji górniczych w GZW zastosowano jeszcze jedno przybliżenie oparte o odchylenie standardowe. W pierwszej kolejności obliczono zasięg  $L_1(H)$  ze wszystkich pikseli spełniających kryterium  $0,75H - 2H$ . Obliczono również odchylenie standardowe z próby  $\sigma_{L_1(H)}$ . Po ponownej filtracji odrzucono wszystkie piksele, które znajdowały się w odległości nie spełniającej zależności (7.3):

$$\begin{cases} L_1(H) - \sigma_{L_1(H)} \\ L_1(H) + \sigma_{L_1(H)} \end{cases} \quad (7.3)$$

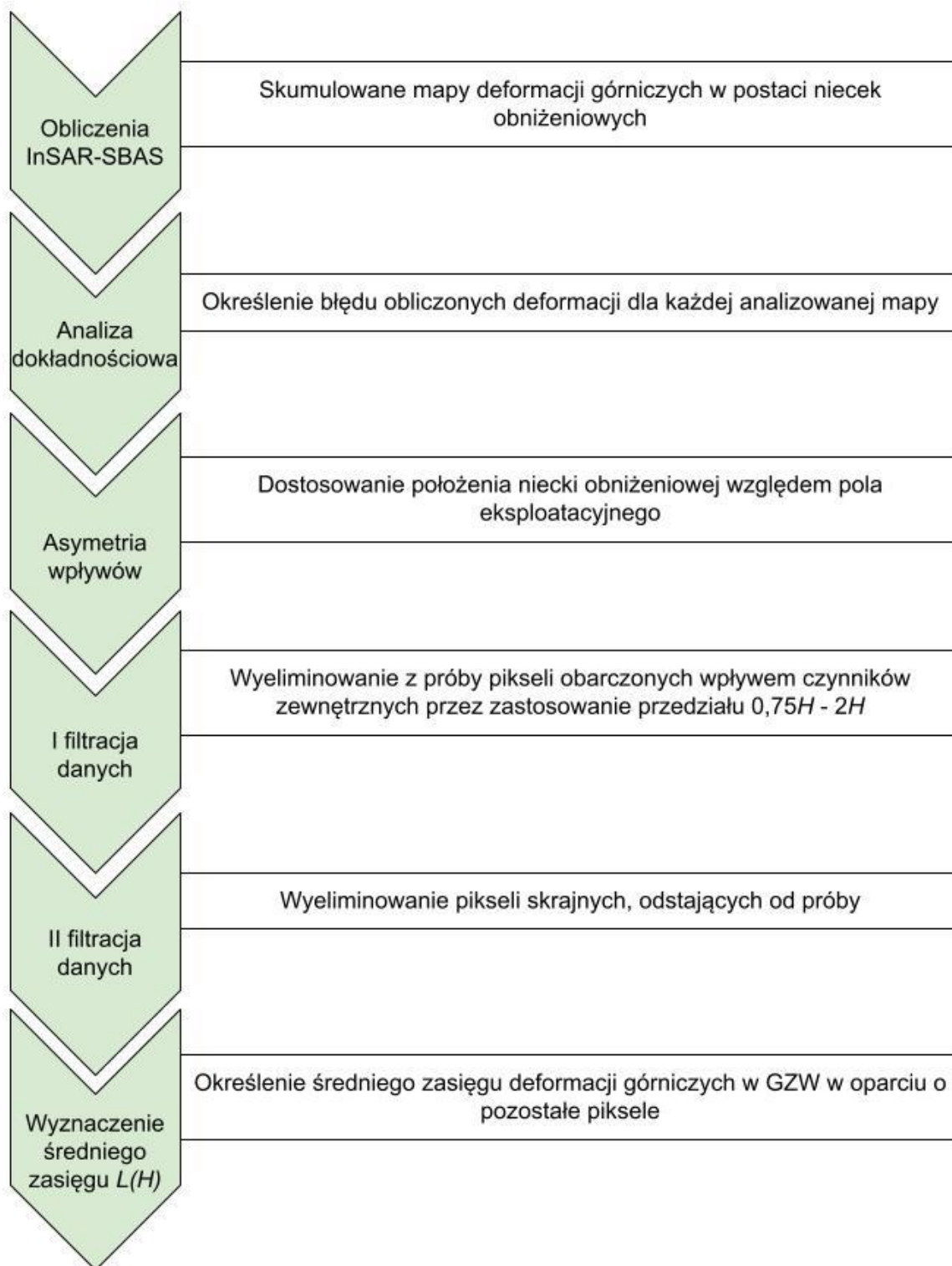
Zabieg ten pozwolił na wyeliminowanie pikseli skrajnych, które również mogą być obciążone pewnymi błędami (lecz nie muszą), ze względu na nieznaną Autorowi czynniki. Z tak wyselekcjonowanych pikseli obliczono ostateczny średni zasięg deformacji górniczych w GZW  $L(H)$  oraz oszacowano jego błąd w postaci odchylenia standardowego  $\sigma L(H)$ .

#### *7.1.5. Podsumowanie metodyki*

Określenia średniego zasięgu deformacji górniczych w GZW dokonano na podstawie eksploatacji prowadzonej w GZW w ostatnich 6 latach. Do wyznaczenia deformacji w sposób ilościowy wykorzystano metodę SBAS interferometrii satelitarnej. Finalnym produktem były mapy rastrowe deformacji górniczych w postaci niecek obniżeniowych skumulowane w 12- i 6-dniowych interwałach dla centralnej części GZW. Dla każdego badanego przypadku określono błąd danej mapy rastrowej. Ze względu na złożoność problemu konieczne było wprowadzenie dodatkowych kryteriów, dostosowujących problem do obecnej wiedzy oraz eliminujących wpływ czynników zewnętrznych, takich jak:

- skorygowanie asymetrii wpływów górniczych,
- filtracja danych w oparciu o teorię Knothe'go oraz aktualną wiedzę naukową,
- filtracja danych w oparciu o odchylenie standardowe próby.

Zastosowaną metodykę przedstawiono na rysunku 7.8.



**Rys. 7.8.** Schemat zastosowanej metodyki do określenia średniego zasięgu deformacji górniczych w GZW (opracowanie własne).

## 7.2. Wyniki badań

Badania wykonano na terenie 5 kopalń w GZW:

1. KWK Piast - Ziemowit Ruch Piast.
2. KWK Bobrek - Piekary Ruch Bobrek.
3. KWK Ruda Ruch Pokój (obecnie SRK Oddział KWK Pokój I – Pokój II).
4. KWK Ruda Ruch Halemba.
5. KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka.

Analizowano 7 przypadków eksploatacji, prowadzonej od 2015 r., systemem ścianowym z zawałem skał stropowych. Głębokość eksploatacji wynosiła od 460 do 834 m, a miąższość od 1,6 do 3,2 m. Nachylenie wybieranych pokładów nie przekroczyło 10°. Charakterystykę warunków górniczych i geologicznych przedstawiono w rozdziale 4.1.4.

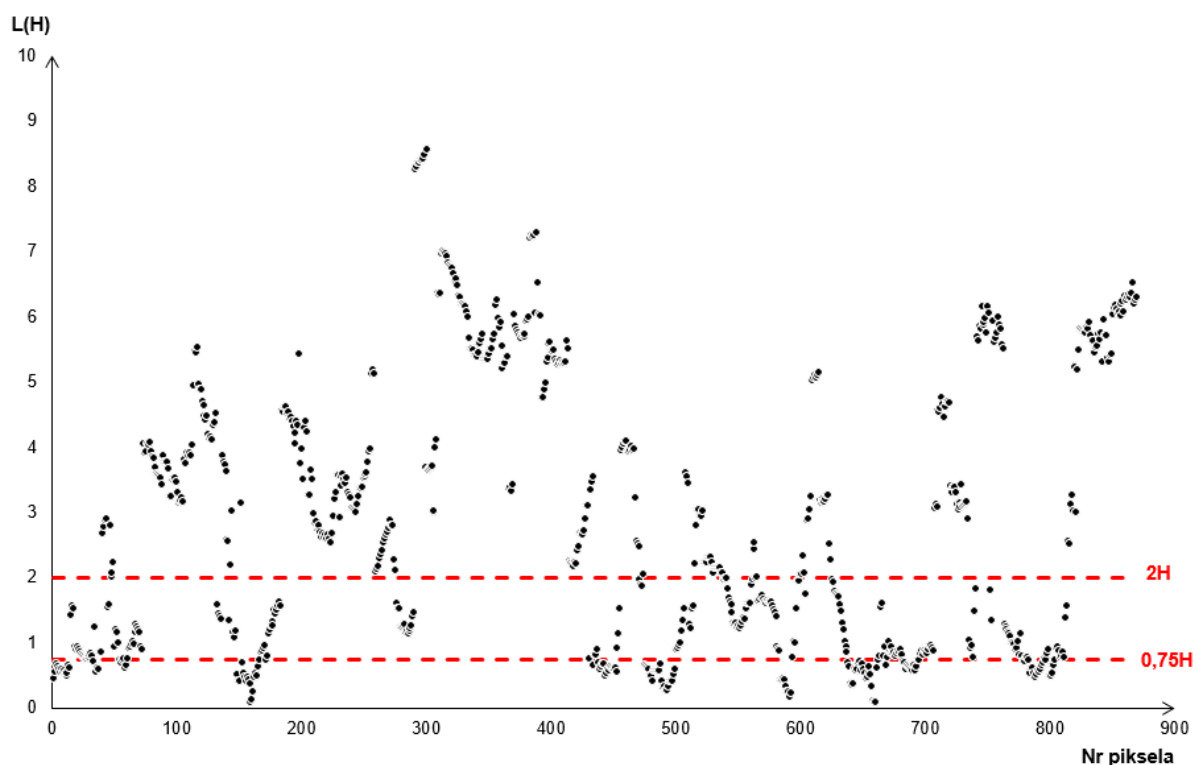
Dla każdego analizowanego przypadku obliczono błąd wyznaczonych obniżeń metodą SBAS według metodyki opisanej w rozdziale 7.1.1. Wartości błędu zamieszczono w tabeli 7.1.

**Tab. 7.1.** Błąd obliczonych deformacji metodą SBAS.

L.p.	Kopalnia	Pokład	Ściana	Czas eksploatacji	Błąd obniżeń wyznaczonych metodą SBAS [mm]	Błąd odniesiony do największego zmierzonego obniżenia [%]
1	Piast-Ziemowit Ruch Piast	209 w. II	373a	06.2020 – 11.2021	±13	1,6
2	Bobrek-Piekary	503	6	09.2016 – 02.2018	±11	0,4
3	Bobrek-Piekary	504	7	04.2018 – 04.2019	±10	brak danych
4	Ruda Ruch Pokój	413/2	132	03.2015 – 02.2016	±9	brak danych
5	Ruda Ruch Halemba	414/1	1	03.2018 – 04.2019	±9	brak danych
6	Ruda Ruch Halemba	414/1	4	06.2020 – 04.2021	±6	brak danych
7	„Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka	406/1	F-3	04.2018 – 11.2020	±27	2,2

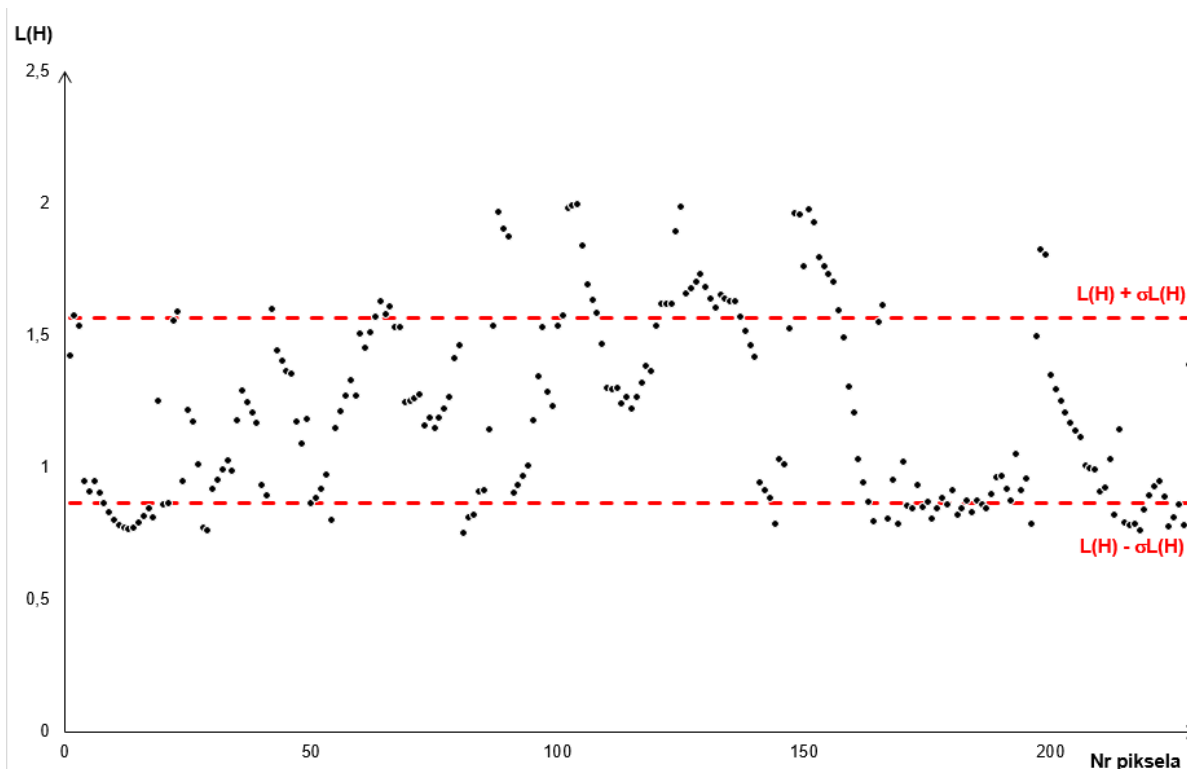
Jak wynika z tabeli 7.1 określony błąd z pomiarów SBAS odniesiony do największego zmierzonego obniżenia na linii pomiarowej kształtował się w przedziale 0,4 – 2,2 %. Znajduje to potwierdzenie w literaturze, gdyż na przestrzeni lat w różnych pozycjach literatury naukowej można spotkać wartości współczynnika zmienności dla obniżeń mieszczące się w przedziale 1,3 – 5,0 % (Niemiec 2020).

Rezultat pierwszej analizy przedstawiono na rysunku 7.9. Analiza obejmowała wszystkie zidentyfikowane piksele, bez filtracji.



**Rys. 7.9.** Wykres przedstawiający wyniki pierwszej, wstępnej analizy zasięgu deformacji opartej na danych niepoddanych filtracji, wraz z kryteriami przyjętymi do pierwszej filtracji danych (czerwone linie) (opracowanie własne).

W 7 analizowanych przypadkach zidentyfikowano 869 pikseli o wartościach mieszających się w granicach wyznaczonych błędów. Średni zasięg deformacji wyliczony w oparciu o powyższe dane wyniósł  $2,84H$  przy odchyleniu standardowym wynoszącym  $2,05H$ . Współczynnik zmienności wyniósł 72%. Można zatem mówić o bardzo dużym zróżnicowaniu populacji, co jest wyraźnie widoczne na wykresie (rys. 7.9). Ma to związek z czynnikami zewnętrznymi oddziałującymi na analizowane dane, takimi jak sąsiednia eksploatacja, prowadzona w analogicznym okresie lub z lokalną charakterystyką małych pól eksploatacyjnych. Zachodzi zatem konieczność ich wyeliminowania, co czynione jest poprzez wprowadzenie założenia w postaci zakresu  $0,75H - 2H$ . Średni zasięg deformacji obliczony z danych po pierwszej filtracji (z 229 pikseli) wyniósł  $1,21H$  (rys. 7.10). Jest to wyraźny spadek wartości zasięgu, co wynika z przyjętych dodatkowych założeń. Wartość zasięgu równa  $1,21H$  jest dużo bardziej tożsama z dotychczasowymi doświadczeniami oraz z teorią opisującą ruchy górotworu. Istotnym elementem jest również odchylenie standardowe, oraz współczynnik zmienności, które odpowiednio wynoszą  $0,35H$  oraz 29%. Znaczny spadek tych wartości, w szczególności współczynnika zmienności, znacząco uwiarygadnia otrzymany wynik w stosunku do poprzedniej próby.

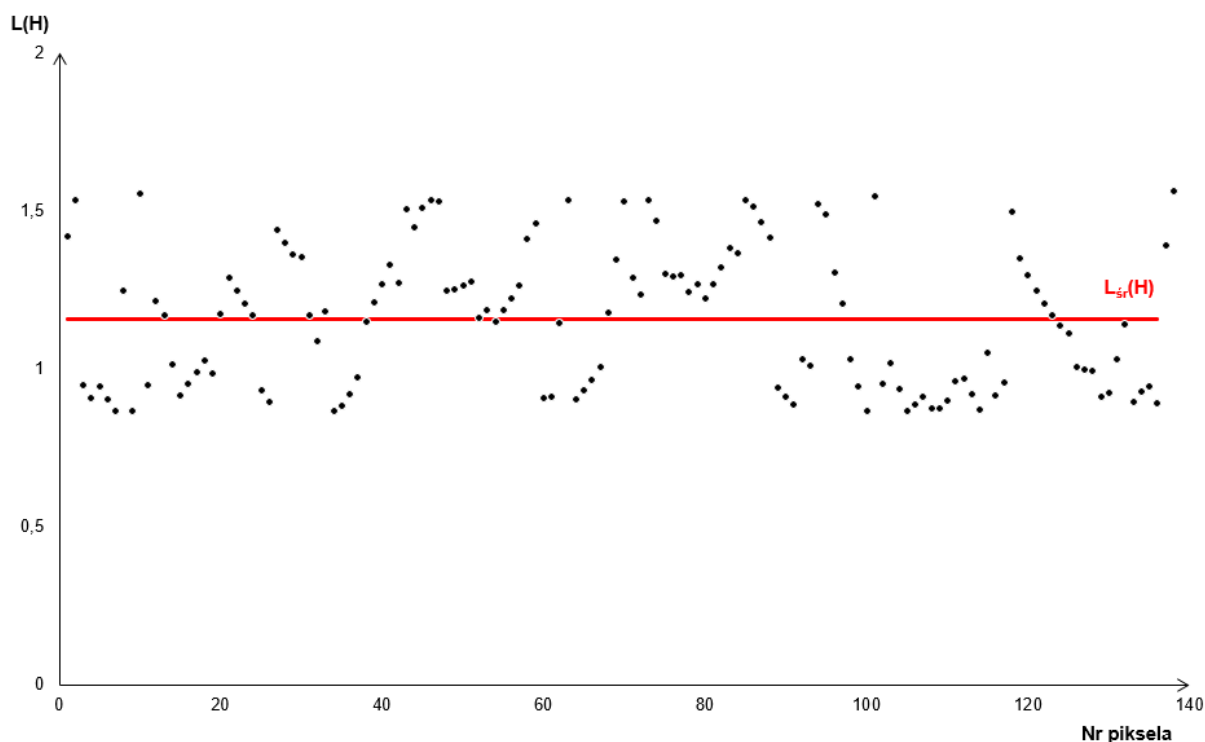


**Rys. 7.10.** Wykres przedstawiający wyniki analizy zasięgu deformacji opartej na danych po I filtracji, wraz z kryteriami przyjętymi do II filtracji danych (czerwone linie) (opracowanie własne).

Zgodnie z opisaną w rozdziale 7.1.4 metodyką przeprowadzono drugą filtrację danych w oparciu o otrzymane odchylenie standardowe, co miało na celu wyeliminowanie pikseli skrajnych, które również mogą być obciążone pewnymi błędami (lecz nie muszą), ze względu na nieznane Autorowi czynniki. W związku z tym odrzucono punkty nie spełniające zależności z rozdziału 7.1.4 (7.3). Średni zasięg deformacji górniczych obliczony po drugiej filtracji (ostatecznie z 138 pikseli) wyniósł  $1,16H$ , przy odchyleniu standardowym  $0,22H$ . Istotnym elementem ponownie jest współczynnik zmienności, który tym razem wyniósł 19%. Znaczne obniżenie odchylenia standardowego oraz współczynnika zmienności świadczy o wiarygodności otrzymanych wyników. Reasumując można stwierdzić, że **średni zasięg deformacji górniczych w warunkach GZW dla eksploatacji systemem ścianowym z zawalem skał stropowych** wynosi (7.4):

$$L_{\text{sr}}(H) = 1,16H \pm 0,22H \quad (7.4)$$

W formie graficznej wyniki wyglądają następująco (rys. 7.11):



**Rys. 7.11.** Wykres przedstawiający wyniki analizy zasięgu deformacji opartej na danych po II filtracji, wraz z obliczonym średnim zasięgiem deformacji górnicych (czerwona linia) (opracowanie własne).

Wątpliwości przy wyznaczaniu średniego zasięgu może budzić duża ilość pikseli odrzuconych na etapie kolejnych przybliżeń. Można to uzasadnić istotą badanych deformacji to jest bardzo małych wartości obniżenia jak i środowiska w którym są badane. W GZW nie można wybrać rejonów badań, w których nie ma eksploatacji prowadzonej w sąsiedztwie. Jednak liczbę 138 pikseli można uznać za odpowiednią jako próbę statystyczną. W każdym analizowanym przypadku liczba pikseli jest powyżej 16, odpowiednio 49, 53, 20, 16, 33, 33, 25 piksele (w kolejności listy z tabeli 7.1), co oznacza, co najmniej 8 klasycznych, geodezyjnych linii pomiarowych. Skompletowanie takiej ilości danych pochodzących z pomiarów wykonywanych metodami klasycznej geodezji mogłoby być problematyczne. W konkluzji, zbiór 138 danych, można uznać za wiarygodny dla wyznaczonej zależności (7.4).

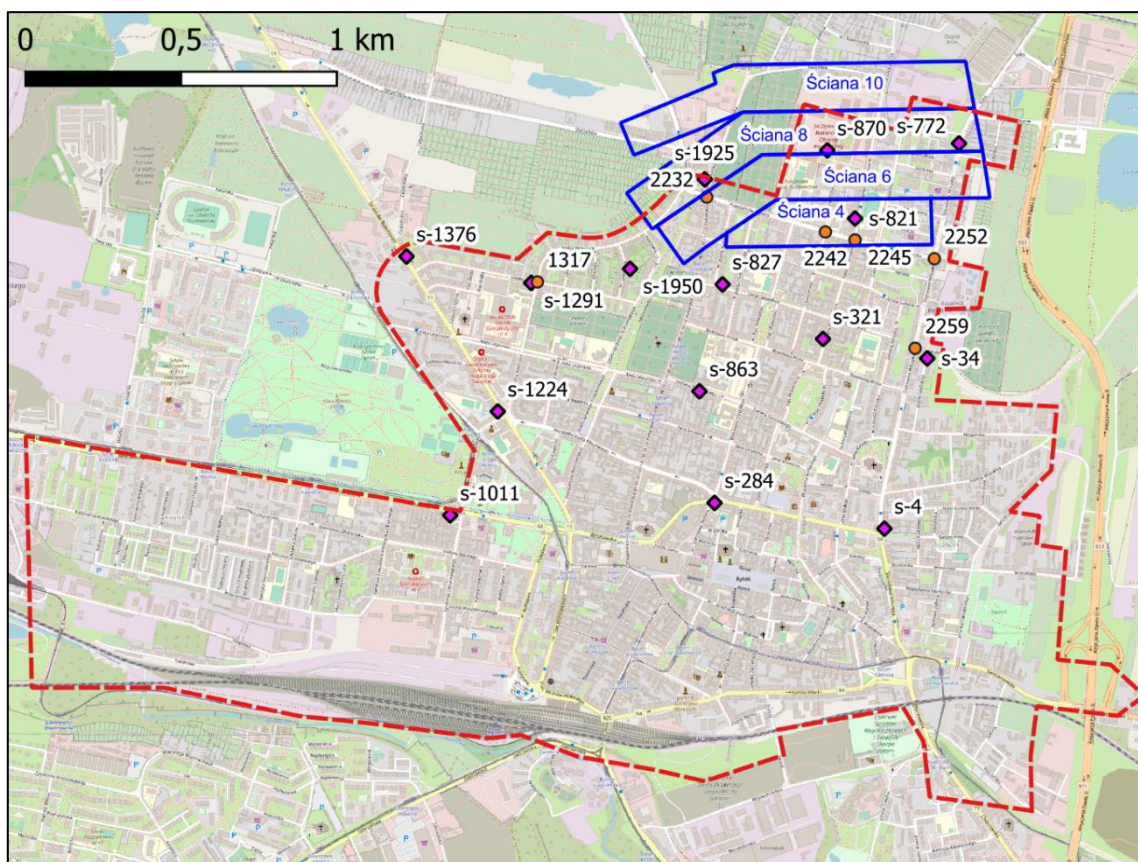


## 8. Czas zanikania deformacji na terenach pogórnich

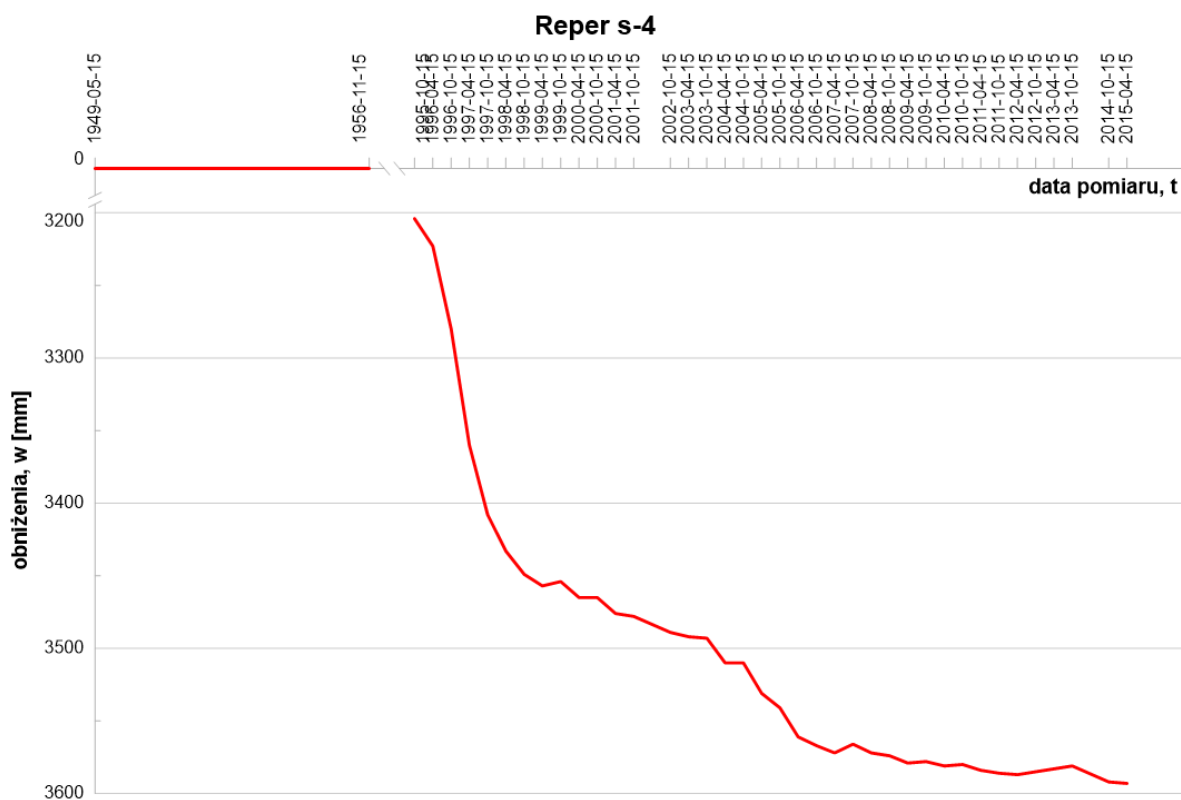
### 8.1. Analiza zanikania deformacji w oparciu o pomiary geodezyjne

Badania czasu zanikania deformacji na terenach pogórnich wykonano na podstawie obniżeń, które geodezyjnie obserwowano w dawnym terenie górniczym KWK Centrum oraz KWK Szombierki, w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia (aktualnie teren pogórnich – patrz rozdział 4.2). Eksploatację w filarze zakończono 28.04.2015 r.

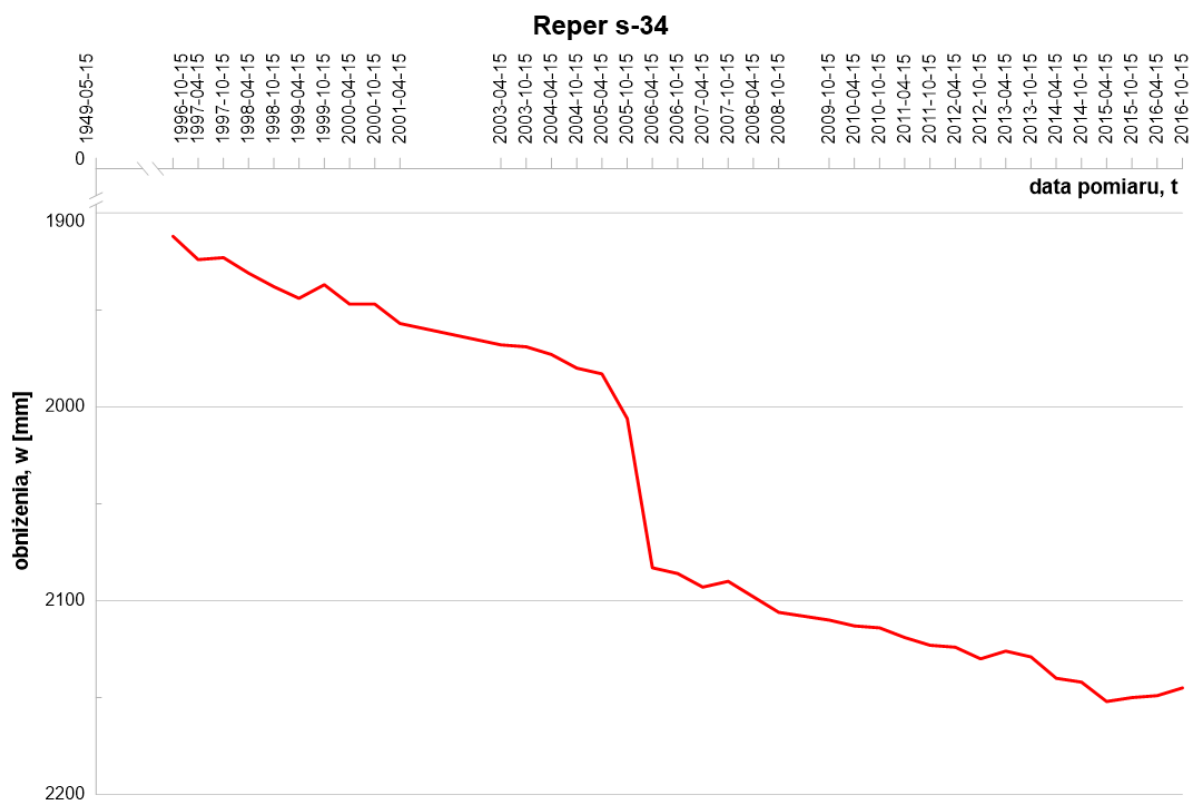
W pierwszej kolejności wykonano analizę na podstawie obniżeń zmierzonych podczas prowadzenia eksploatacji na 15 reperach, które były równomiernie rozmieszczone w centralnej i północnej części filara i które były pod wpływem eksploatacji węgla kamiennego prowadzonej przez kopalnię Centrum do 2015 r. W południowej części kopalnia Szombierki zakończyła eksploatację w 1999 r. (rys. 8.1). Pomiary wykonywano od 1949 roku, a wyniki obniżeń za cały okres eksploatacji przedstawiono na rysunkach 8.2 – 8.16. Największe obniżenia zmierzono w północno-zachodniej części filara ochronnego, na reperze nr s-1224 wyniosły 6190 mm, a na pozostałych kształtowały się powyżej 5 m. Rejon północno-wschodni uległ mniejszemu obniżeniu, gdzie zmierzono obniżenia wynoszące 4197 mm.



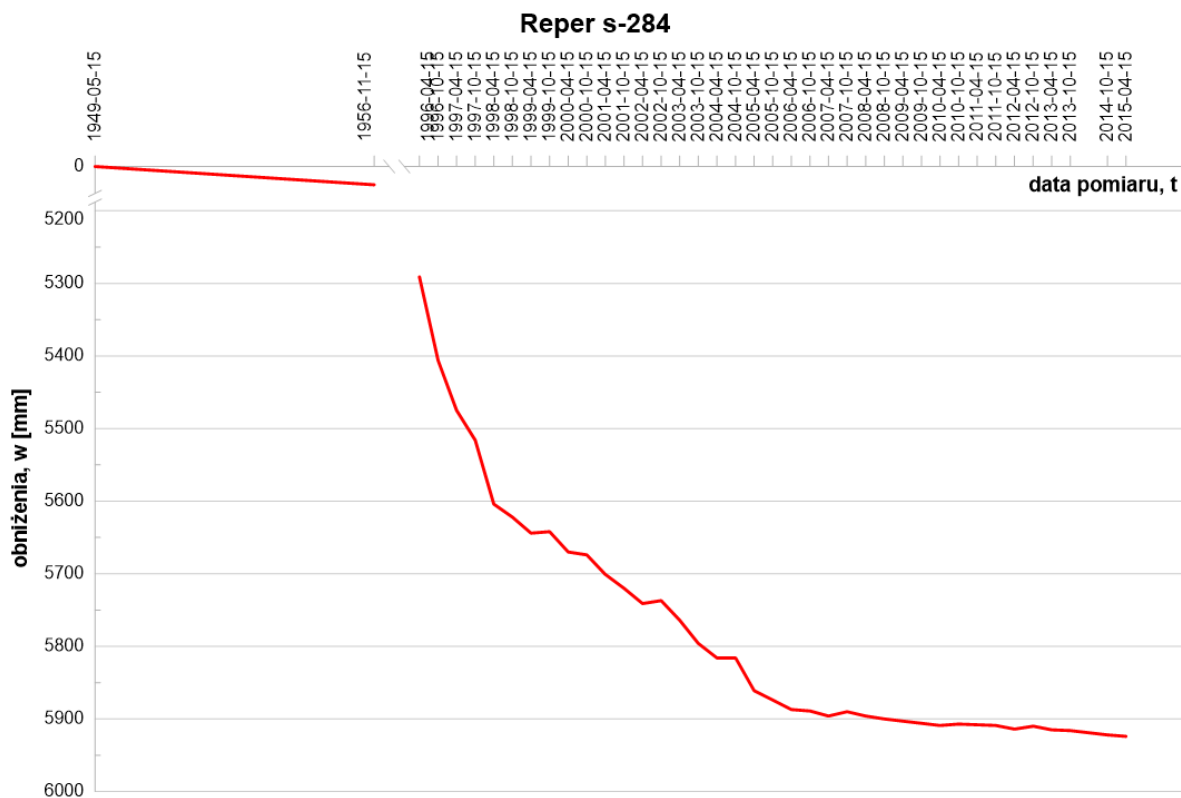
**Rys. 8.1.** Rozmieszczenie reperów mierzonych w trakcie eksploatacji (fioletowe kwadraty) oraz po zakończeniu eksploatacji (pomarańczowe koła) wraz z lokalizacją ostatniej eksploatacji w pokładzie 510wd (niebieskie linie) w rejonie filara ochronnego Śródmieścia Bytomia – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).



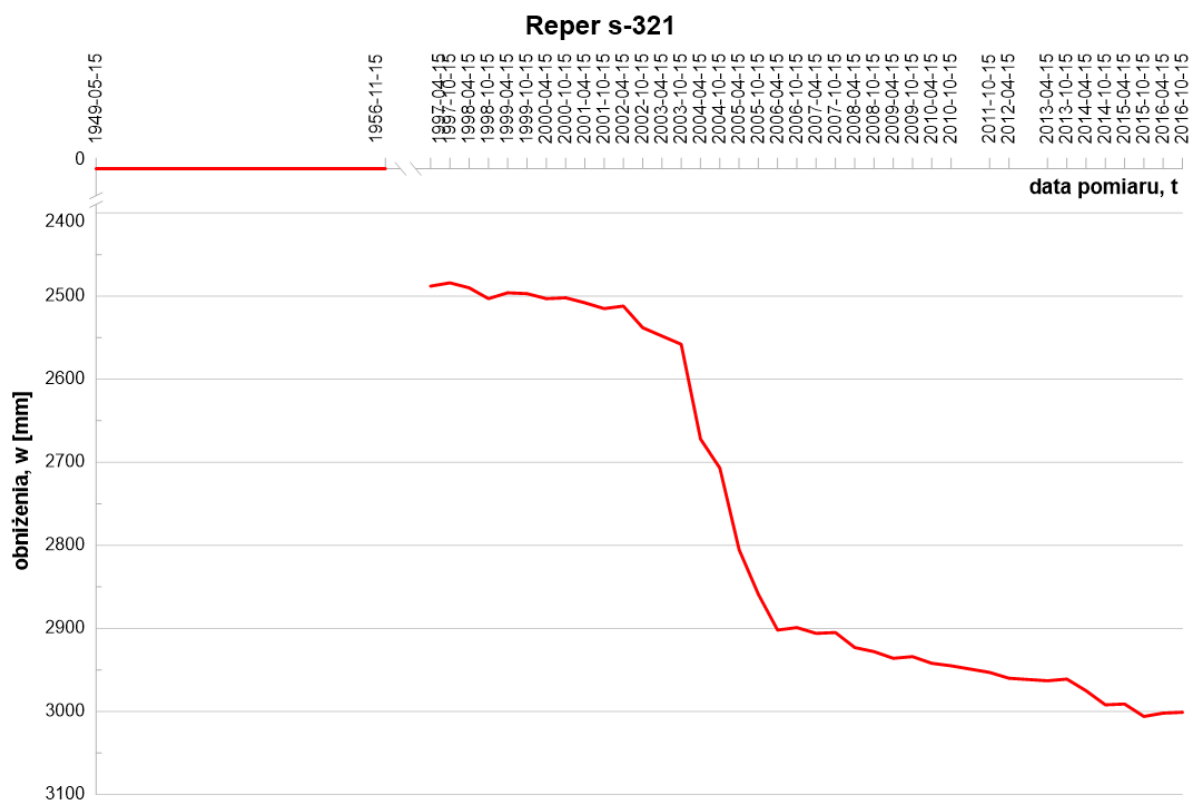
**Rys. 8.2.** Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-4 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).



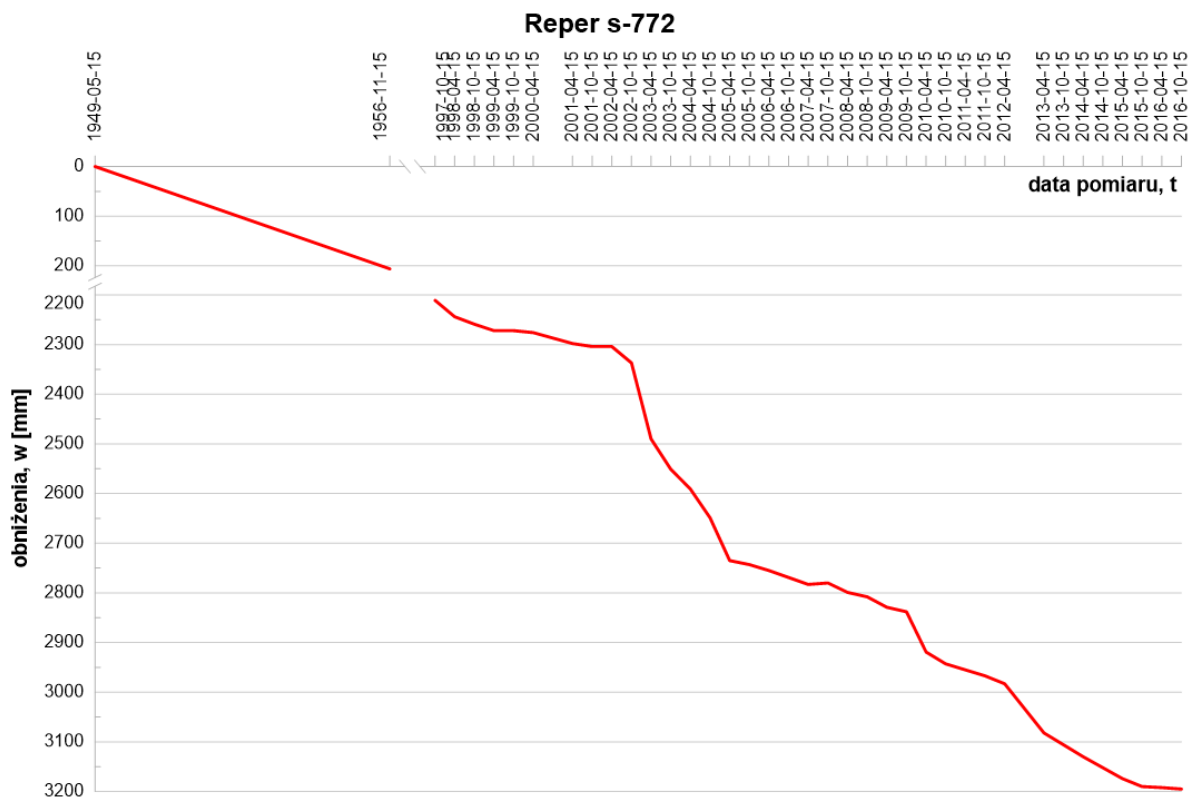
**Rys. 8.3.** Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-34 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).



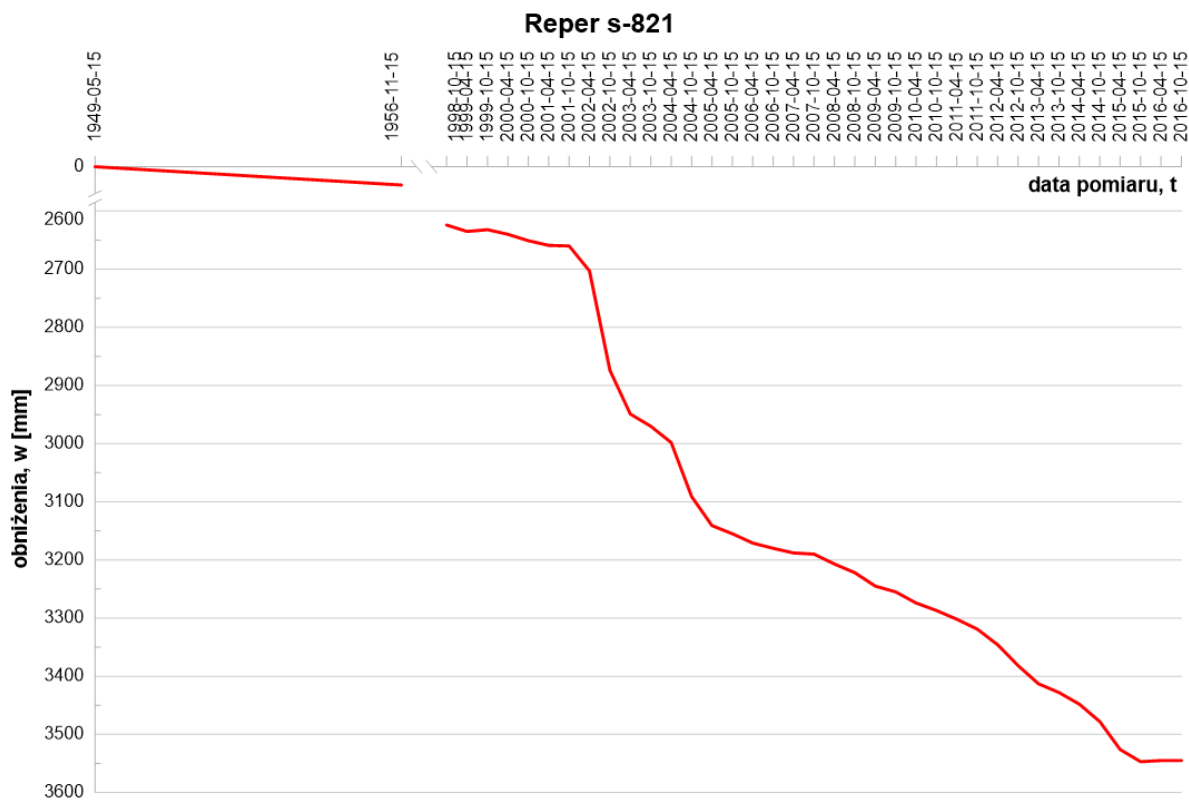
**Rys. 8.4.** Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-284 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).



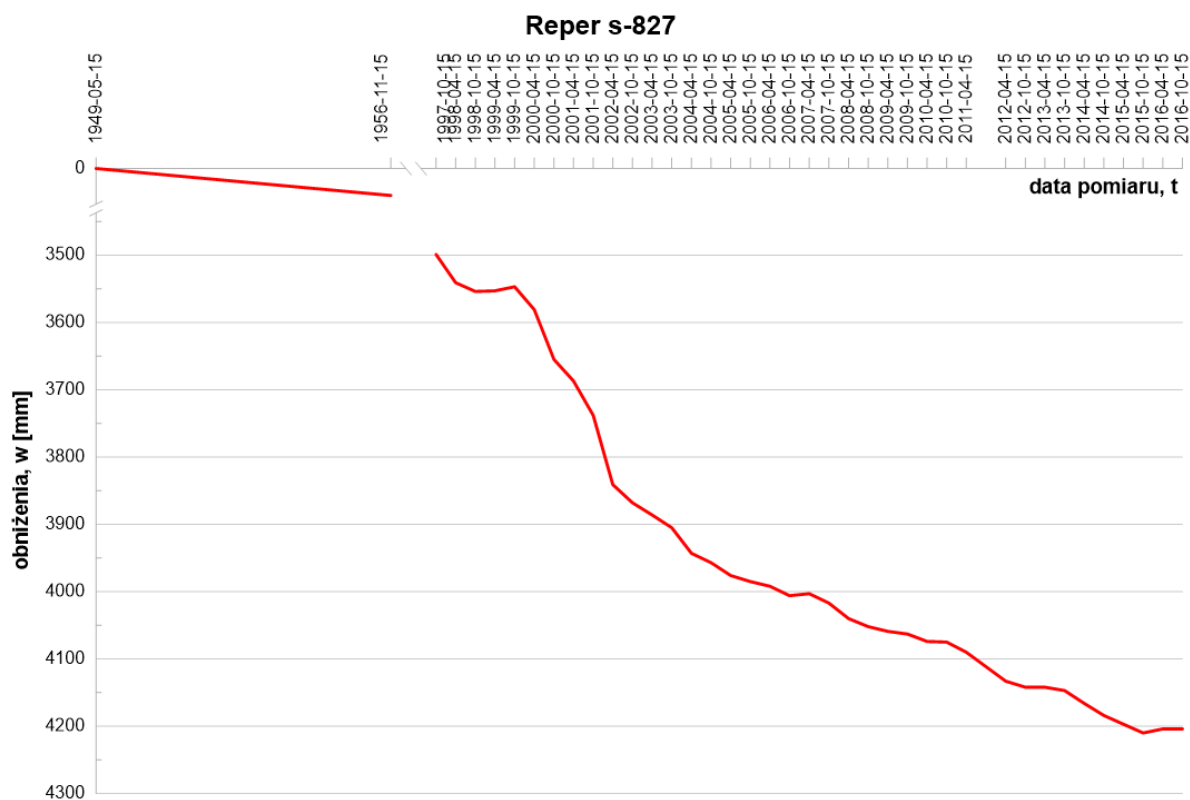
**Rys. 8.5.** Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-321 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).



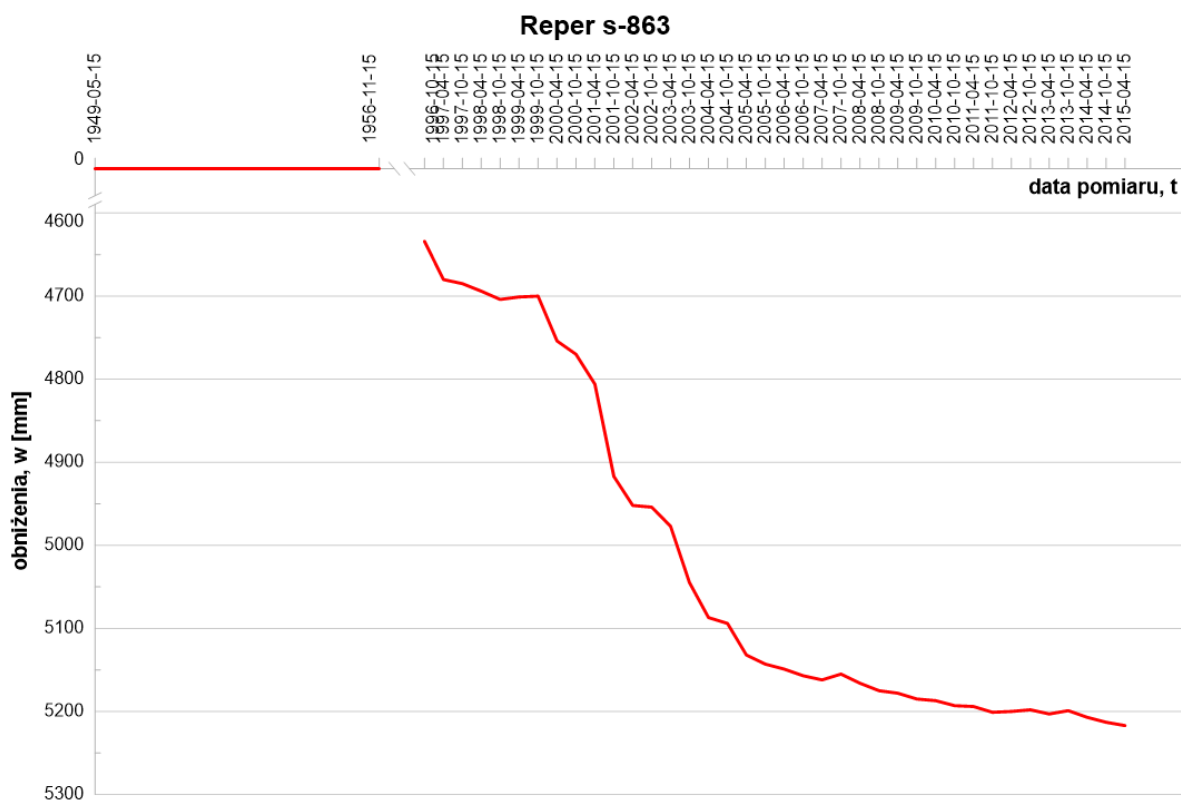
**Rys. 8.6.** Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-772 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).



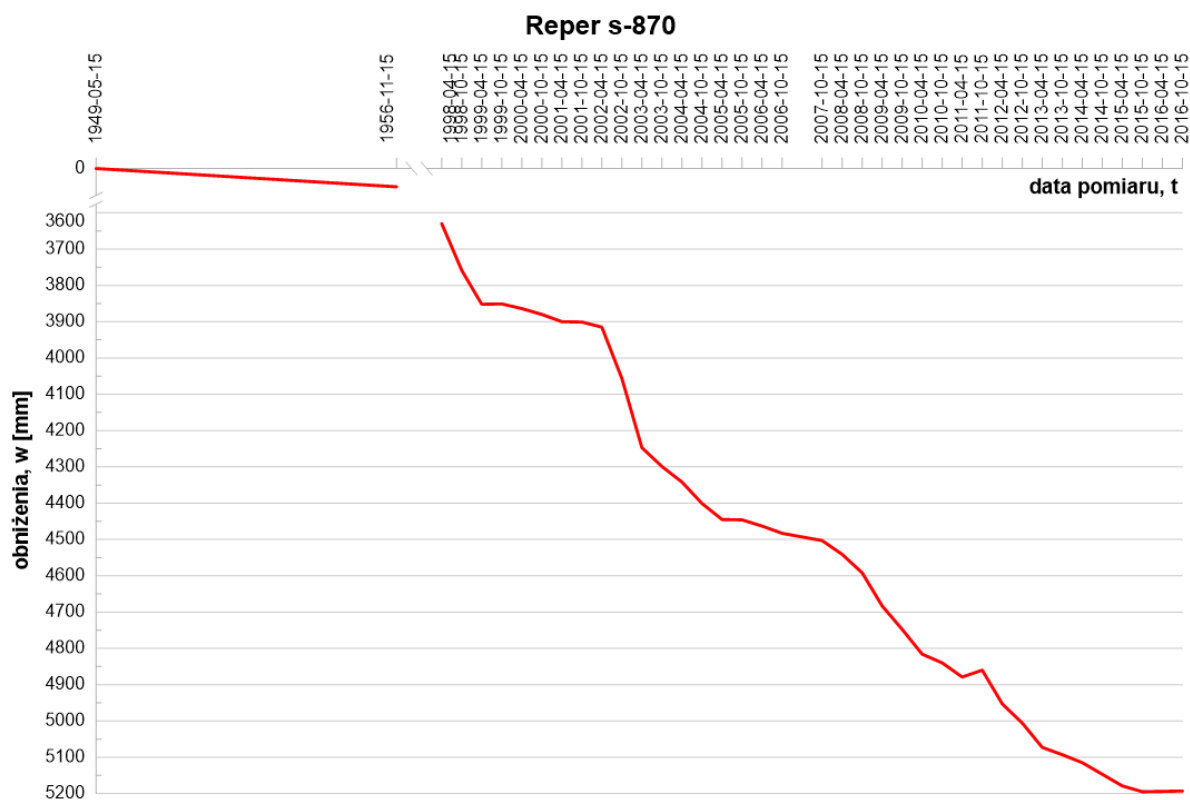
**Rys. 8.7.** Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-821 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).



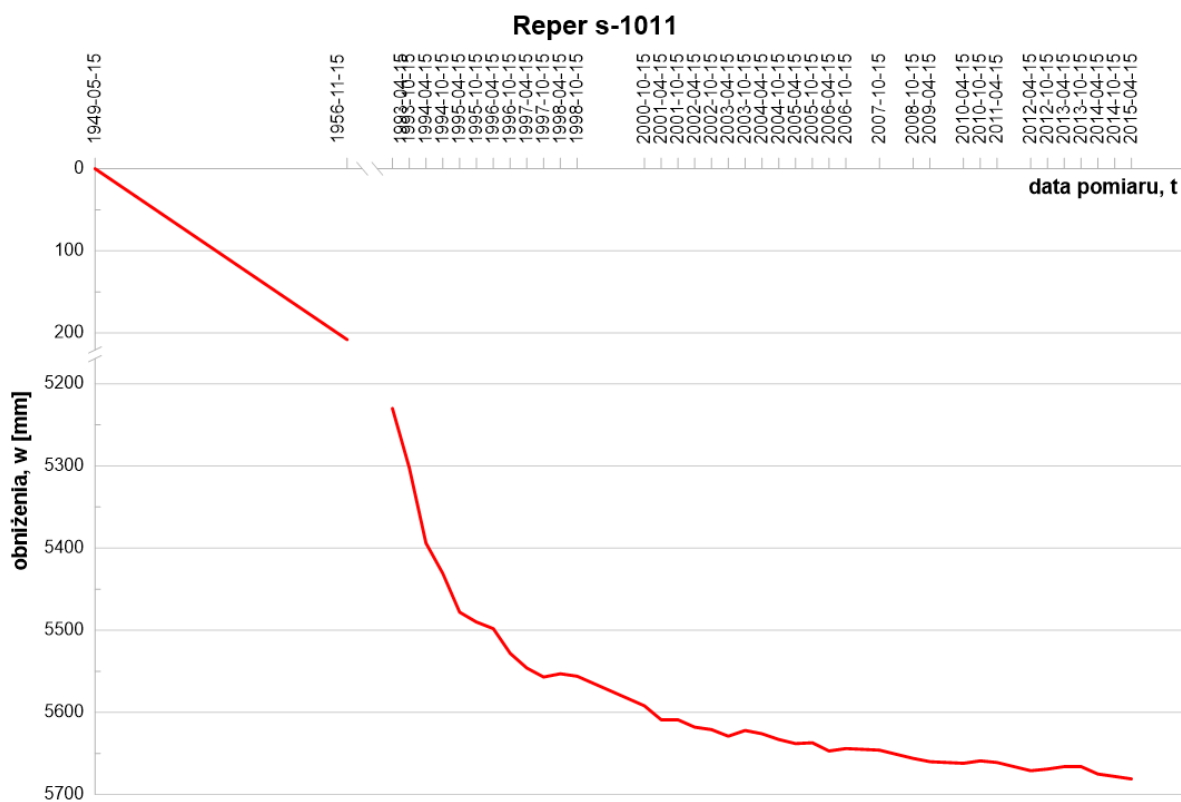
**Rys. 8.8.** Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-827 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).



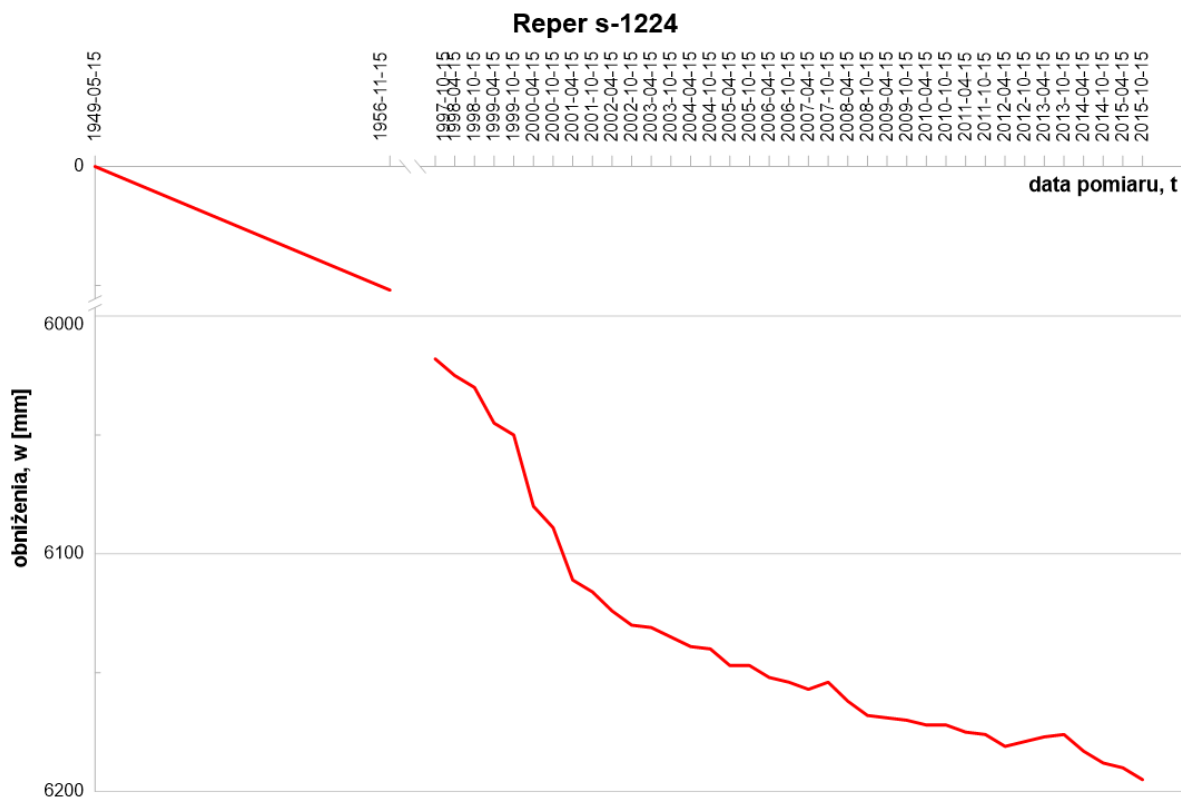
**Rys. 8.9.** Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-863 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).



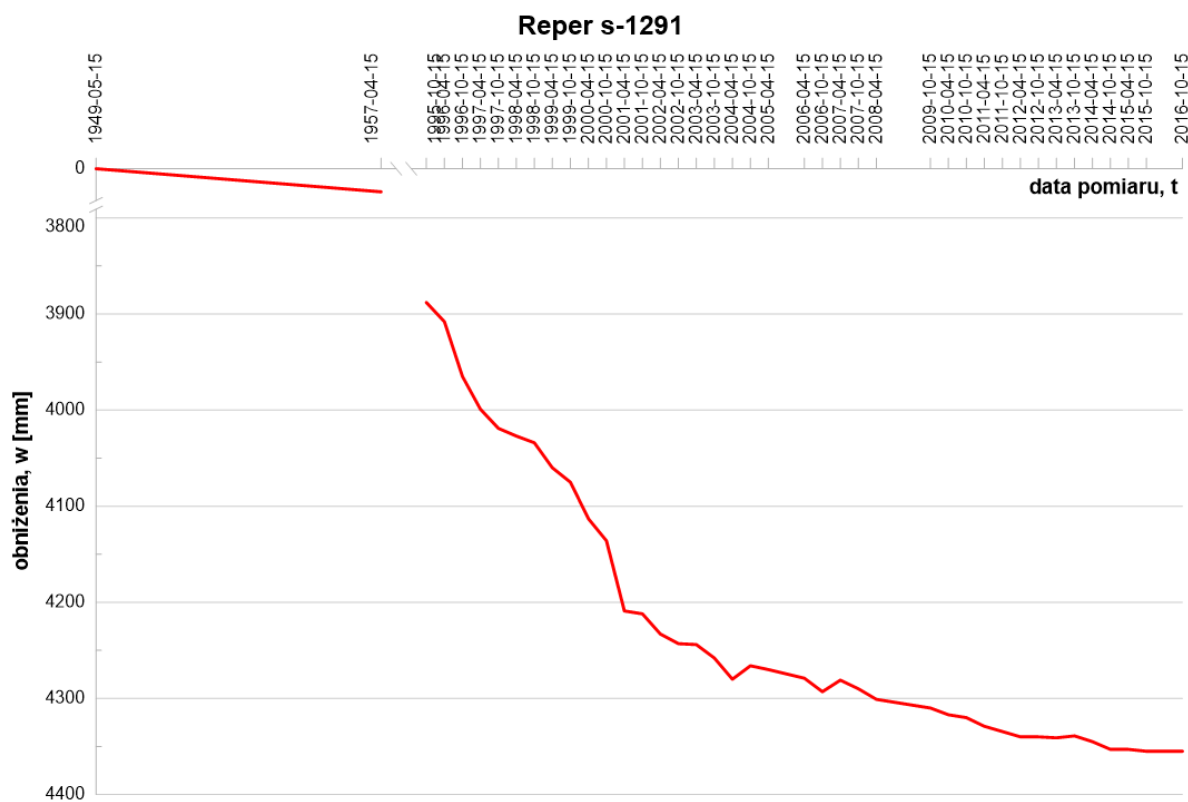
**Rys. 8.10.** Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-870 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).



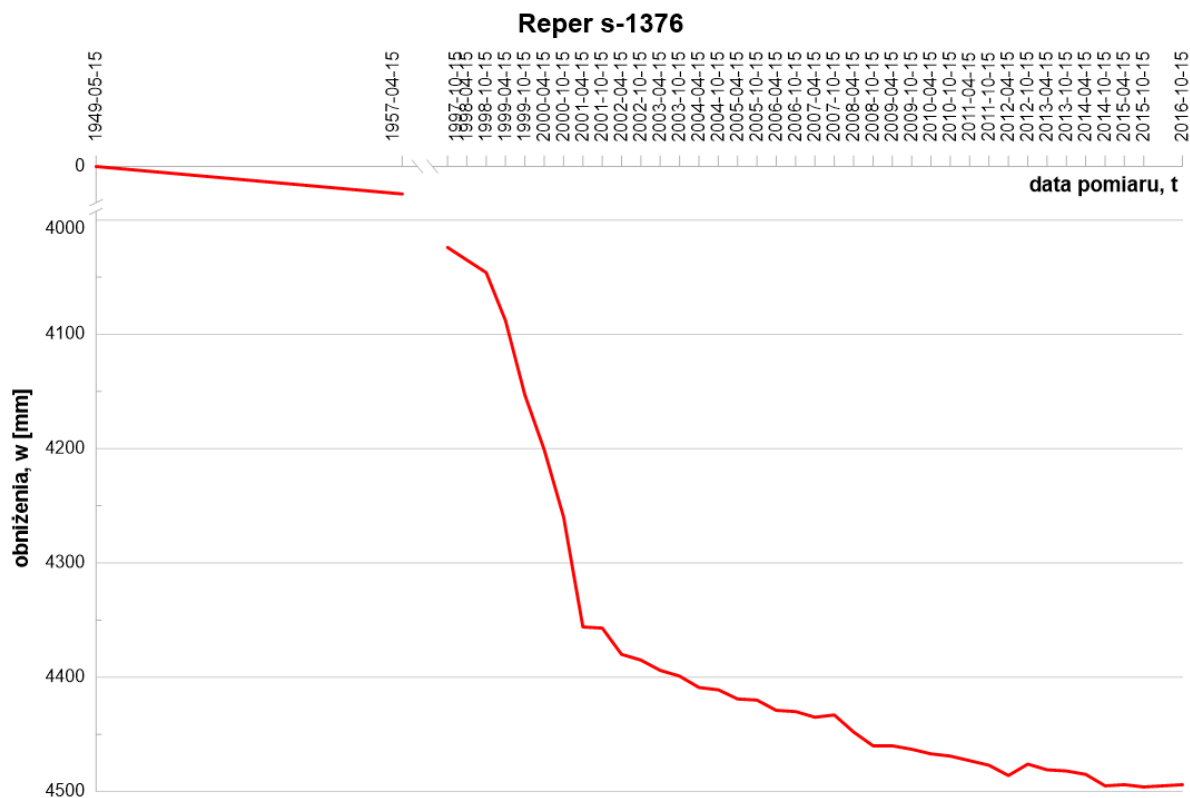
**Rys. 8.11.** Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-1011 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).



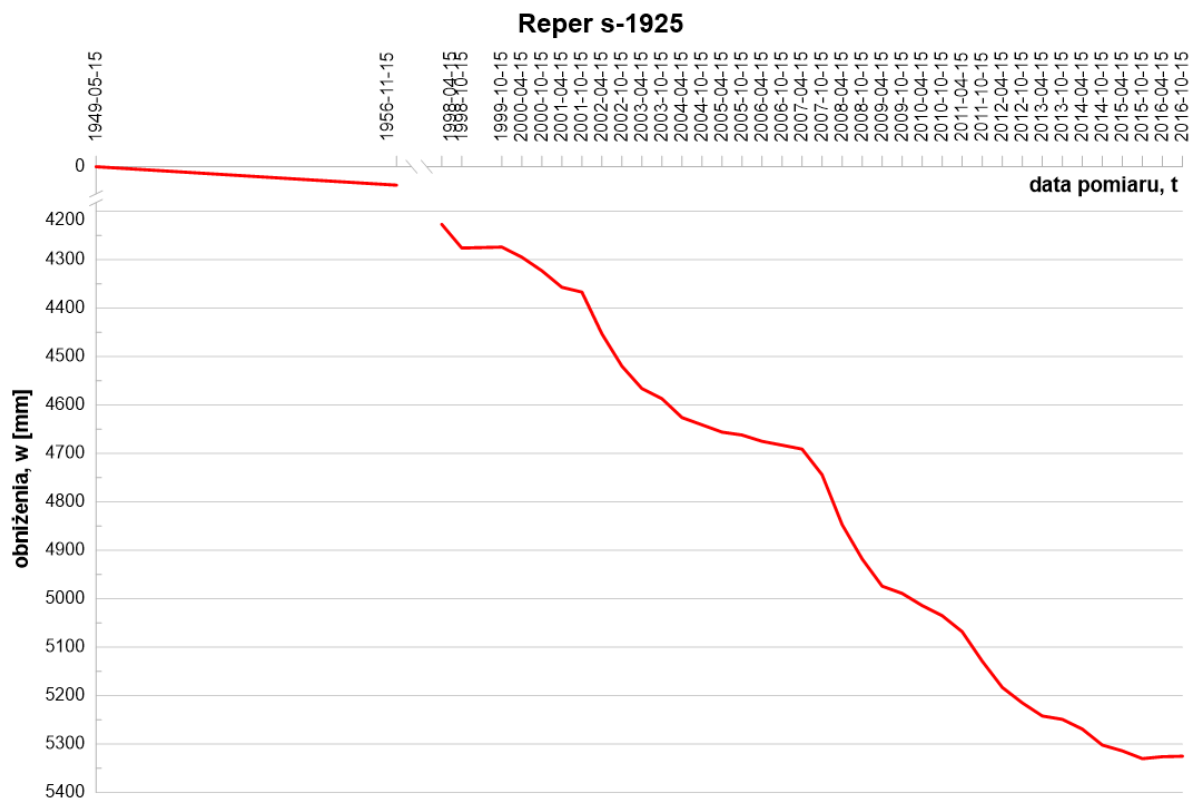
**Rys. 8.12.** Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-1224 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).



**Rys. 8.13.** Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-1291 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).

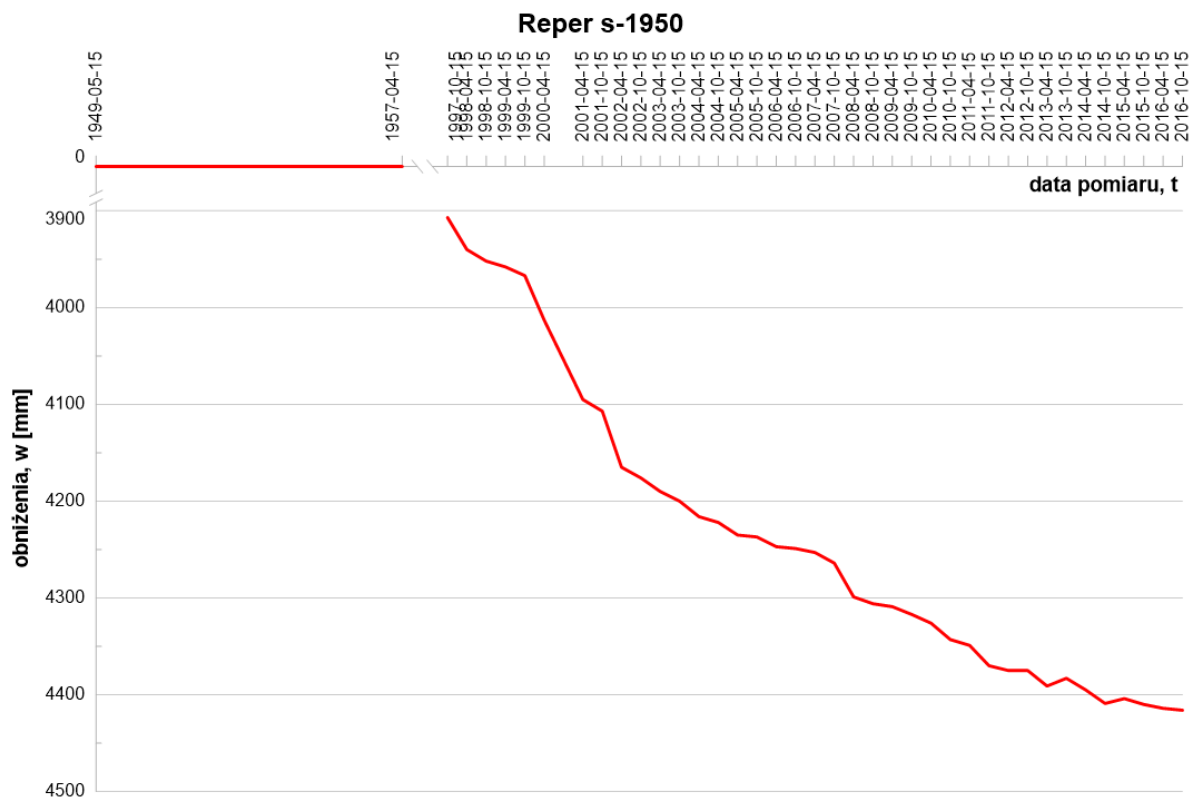


**Rys. 8.14.** Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-1376 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).



**Rys. 8.15.** Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-1925 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).





**Rys. 8.16.** Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-1950 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).

W celu określenia teoretycznego czasu występowania deformacji po zakończeniu eksploatacji wykorzystano funkcję czasu Knothego (patrz rozdział 3.1.4), dla której na podstawie zmierzonych obniżeń na poszczególnych reperach, wyznaczono współczynnik czasu  $c$  (tab. 8.1). Następnie do dalszej analizy uwzględniono współczynniki o najmniejszych odchyleniach standardowych. Do ich wyznaczenia wykorzystano algorytm opisujący zanikanie obniżeń metodą najmniejszych kwadratów, zaimplementowany do autorskiego oprogramowania komputerowego opracowanego w GIG (Kowalski i in. 2000).

**Tab. 8.1.** Wyznaczone współczynniki czasu  $c$  z odchyleniem standardowym dla każdego repera mierzonego w trakcie trwania eksploatacji i obliczoną wartością średnią wraz z wartościami, które nie zostały wzięte do obliczeń ze względu na duże odchylenie standardowe (wartości przekreślone).

Nr Repera	$c$	$\sigma c$
s-4	1,39	0,0017
s-34	1,17	0,1939
s-284	0,71	0,0627
<del>s-321</del>	<del>1,23</del>	<del>1,4326</del>
s-772	1,32	0,9560
s-821	0,79	0,5877
s-827	1,09	0,0262
s-863	0,67	0,0776
<del>s-870</del>	<del>1,41</del>	<del>3,5556</del>
s-1011	0,85	0,5432
s-1224	1,05	0,2891
s-1291	1,06	0,9089
<del>s-1376</del>	<del>1,21</del>	<del>1,4045</del>
<del>s-1925</del>	<del>0,56</del>	<del>0,5691</del>
s-1950	1,01	0,1275
<b><u>Średnia</u></b>	<b><u>1,01</u></b>	<b><u>0,3431</u></b>

Z tabeli 8.1 wynika, że wyznaczona wartość współczynnika czasu określona na określona na podstawie zmierzonych obniżeń wahała się w granicach 0,56 - 1,41. Średnia wartość wyniosła 1,01 przy średnim odchyleniu standardowym równym 0,3431. W obliczeniach średniej pominięto wartości współczynników, których odchylenia standardowe były większe od ich wartości (repery nr: s-321, s-870, s-1376 i s-1925), ponieważ mogłyby one mieć negatywny wpływ na wynik końcowy. Wykorzystując wyznaczona wartość średnią (tab. 8.1) oraz założenie, że 99% deformacji już wystąpiło (Dokumentacja GIG 2020), teoretyczny czas zanikania obniżeń w analizowanych terenie, według funkcji Knothego wyniósł (8.1):

$$t = -\frac{1}{c} \ln \left( 1 - \frac{\Delta w}{w_{as}} \right) = -\frac{1}{c} \ln(0,01) = 4,56 \approx \mathbf{4 \text{ lata } 7 \text{ miesięcy}} \quad (8.1)$$

W kolejnej analizie wyznaczono wartość współczynnika czasu  $c$  dla kolejnych pomiarów obniżeń, które prowadzono przez 3,5 roku po zakończeniu eksploatacji (tab. 8.2). Na 6 reperach (rys. 8.1) wykonano 5 cykli pomiarowych, a największe obniżenie wyniosło 27 mm (patrz rozdział 4.2.4, rys. 4.25). Dla wszystkich wartości współczynnika odchylenie standardowe było równe 0, co nie oznacza, że nie były one obarczone żadnym błędem. Fakt ten, wynika z małej liczby cykli pomiarowych i zależy założyć, że przy tak małej liczbie danych wyznaczenie odchylenia standardowego było niemożliwe.

**Tab. 8.2.** Wyznaczone współczynniki czasu  $c$  dla każdego repera mierzonego po zakończeniu eksploatacji wraz z obliczoną wartością średnią.

Nr Repera	Obniżenie, $w$ [mm]	$c$
1317	3	0,41
2232	18	0,88
2242	26	0,31
2245	27	0,52
2252	19	0,53
2259	2	0,27
<b>Średnia</b>	-	<b>0,48</b>

Przyjmując takie same założenia jak w przypadku pomiarów wykonywanych w trakcie eksploatacji, średni czas zanikania obniżeń na badanym terenie powinien wynieść (8.2):

$$t = -\frac{1}{c} \ln \left( 1 - \frac{\Delta w}{w_{as}} \right) = -\frac{1}{c} \ln(0,01) = 9,59 \approx \mathbf{9 \text{ lat } 7 \text{ miesięcy}} \quad (8.2)$$

W 3,5 roku po zakończeniu eksploatacji nadal notowano niewielkie przyrosty obniżeń powierzchni, co wskazuje, że proces deformacji terenu nie był zakończony. Niestety, brak jest jednoznacznego potwierdzenia tego fakty w pomiarach geodezyjnych, ponieważ nie były one później wykonywane. Należy również zaznaczyć, że w analizach uwzględniono również wpływ zatapiania górotworu, który można pominąć z uwagi na prowadzone odwadnianie górotworu za pomocą pompowni stacjonarnych.

## 8.2. Analiza zanikania deformacji w oparciu i pomiary InSAR

### 8.2.1. Opis metody wyznaczania współczynnika czasu $c$ z pomiarów InSAR

W badaniach czasu zanikania deformacji na terenach pogórnich wykorzystano wyniki obniżeń powierzchni w kierunku LOS otrzymane z przetwarzania obrazów SAR metodą PSInSAR. Ruchy powierzchni występujące po zakończeniu eksploatacji z reguły są niewielkie. Osiągają wartości kilkudziesięciu centymetrów na przestrzeni kilku lat. Metoda PSInSAR pozwala na identyfikację nawet bardzo małych ruchów dochodzących do 1 – 3 mm lub 0,1 – 0,5 mm/rok (Colesanti i in. 2003) (szczegółowy opis metody – patrz rozdział 5.2.1). Ponadto, studium literatury wykazało przykłady, w których z powodzeniem wykorzystano metodę PSInSAR do identyfikacji ruchów powierzchni na terenach pogórnich (Vervoort, Declercq 2017; Milczarek i in. 2017). W związku z tym jest ona odpowiednia do badania czasu zanikania deformacji na terenach pogórnich.

Do wyznaczenia współczynnika czasu  $c$  niezbędna jest znajomość obniżenia danego punktu w funkcji czasu. Ruchy powierzchni zobrazowane są w postaci punktów PS w funkcji

czasu, jednak ich liczba i lokalizacja różnią się w poszczególnych okresach obliczeniowych, co jest związane z liczbą zobrażeń w danym stosie, geometrią akwizycji zobrażeń oraz liczbą i lokalizacją stabilnych rozpraszaczy. Nie bez znaczenia jest również zmienność czynników determinujących wegetację roślin.

W celu uzyskania jednoznacznego obniżenia terenu w całym okresie badań (24.04.2015 – 30.03.2022) w danym punkcie, w pierwszej kolejności należy uśrednić wyniki z obszaru o zadanym promieniu wokół tego punktu we wszystkich 6 okresach obliczeniowych, a następnie uśrednione wartości zsumować. Aby określić wartość promienia wykonano analizę statystyczną opartą o odchylenia standardowe. Dla poszczególnych okresów uwzględniono wartości obniżeń w kierunku LOS wszystkich punktów PS zlokalizowanych w promieniu 10, 20, 30, 40 oraz 50 m wokół 6 reperów pomiarowych, na których prowadzono pomiary geodezyjne po zakończeniu eksploatacji górniczej (patrz rozdział 8.1, rys. 8.1), ponieważ obniżenia w kierunku LOS określone metodą PSInSAR również miały miejsce po zakończeniu eksploatacji. Dla wszystkich 6 okresów z wartości obniżeń w kierunku LOS zanotowanych na wszystkich punktach PS zlokalizowanych wokół reperów pomiarowych o zadanym promieniu obliczono:

1. Odchylenia standardowe obniżeń zanotowanych w danym dniu pomiarowym (dniu wykonania zobrażenia przez satelitę), które następnie zostały uśrednione w celu otrzymania jednej wartości określającej błąd wyznaczonych obniżeń w danym okresie obliczeniowym (w tabeli 8.3 oznaczona symbolem  $\bar{x}$ ).
2. Odchylenie standardowe z całej próby to jest z obniżeń w kierunku LOS zanotowanych na wszystkich punktach PS (w tabeli 8.3 oznaczone symbolem  $\sigma$ ).

Aby wytypować jedną wartość promienia dla wszystkich 6 okresów obliczeniowych, otrzymane wartości odchyleń uśredniono i to one ostatecznie były brane pod uwagę w końcowym rozrachunku. Wyniki zestawiono w tabeli 8.3.

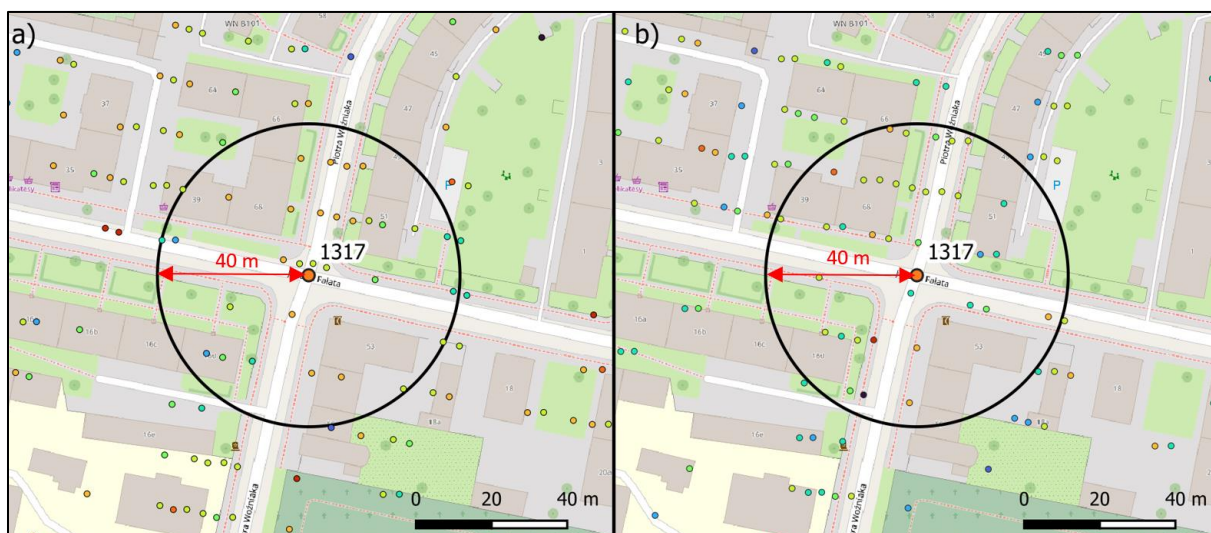
**Tab. 8.3.** Wartości otrzymane w wyniku przeprowadzonej analizy statystycznej dotyczącej wyznaczenia promienia obszaru wokół reperów pomiarowych, z którego uśrednione zostaną obniżenia w kierunku LOS zanotowano na punktach PS.

Promień [m]	Stos	Okres obliczeniowy	Reper pomiarowy											
			1317		2232		2242		2245		2252		2259	
			$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
10	I	24.04.2015 – 30.04.2016	2,61	3,21	bd*	bd	bd	bd	bd	3,63	2,64	3,48	0,87	2,49
	II	30.04.2016 – 01.05.2017	1,69	2,56	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	3,33	1,70	3,43
	III	01.05.2017 – 02.05.2018	1,44	2,41	bd	3,08	bd	3,31	bd	2,41	bd	2,33	1,11	2,65
	IV	02.05.2018 – 05.11.2019	1,92	2,93	bd	bd	bd	bd	bd	3,25	bd	3,21	0,83	2,74
	V	05.11.2019 – 21.02.2021	2,50	2,89	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	2,85	0,98	2,11
	VI	21.02.2021 – 30.03.2022	1,49	4,06	bd	2,73	bd	bd	5,13	4,67	bd	4,16	5,68	5,52
	Średnia		1,94	3,01	bd	2,91	bd	3,31	5,13	3,49	2,64	3,23	1,86	3,16
20	I	24.04.2015 – 30.04.2016	2,23	3,00	1,96	4,38	2,53	3,10	4,91	5,50	2,41	3,21	3,27	3,80
	II	30.04.2016 – 01.05.2017	2,55	3,14	bd	bd	bd	4,31	bd	bd	2,49	3,32	2,04	3,63
	III	01.05.2017 – 02.05.2018	2,53	3,04	2,10	3,56	2,68	3,42	1,82	2,68	2,95	3,49	2,29	3,05
	IV	02.05.2018 – 05.11.2019	2,16	3,12	1,51	3,18	bd	bd	2,23	3,08	2,53	3,33	2,19	3,13
	V	05.11.2019 – 21.02.2021	2,05	2,69	1,23	2,62	bd	bd	bd	bd	3,01	3,56	1,76	2,53
	VI	21.02.2021 – 30.03.2022	5,55	5,40	bd	2,73	9,59	7,76	7,83	7,42	11,48	10,70	6,59	6,39
	Średnia		<b>2,84</b>	<b>3,40</b>	<b>1,70</b>	3,29	4,93	<b>4,65</b>	4,20	4,67	4,14	4,60	<b>3,02</b>	3,75
30	I	24.04.2015 – 30.04.2016	3,40	3,82	3,06	4,51	5,51	5,74	3,92	4,76	2,69	3,62	3,09	3,45
	II	30.04.2016 – 01.05.2017	3,17	3,67	1,41	3,17	2,47	4,08	2,01	4,01	2,94	3,65	3,00	3,68
	III	01.05.2017 – 02.05.2018	2,77	3,25	2,35	3,36	3,39	3,87	5,05	5,36	3,13	3,62	2,84	3,30
	IV	02.05.2018 – 05.11.2019	2,67	3,49	1,66	3,07	3,36	4,11	3,40	3,91	2,63	3,38	3,57	4,05
	V	05.11.2019 – 21.02.2021	1,92	2,57	1,86	2,73	1,13	2,55	2,27	2,93	3,17	3,67	2,27	2,78
	VI	21.02.2021 – 30.03.2022	6,15	6,12	2,35	2,65	11,36	10,59	7,62	7,46	9,77	9,45	5,58	5,66
	Średnia		3,35	3,82	2,12	<b>3,25</b>	4,54	5,16	4,05	4,74	4,06	4,56	3,39	3,82
40	I	24.04.2015 – 30.04.2016	3,50	3,92	3,63	4,53	4,33	5,09	3,27	4,27	3,19	3,94	2,89	3,27
	II	30.04.2016 – 01.05.2017	3,11	3,63	2,51	3,78	2,99	3,92	2,94	3,74	3,29	3,94	3,41	3,92
	III	01.05.2017 – 02.05.2018	2,67	3,17	3,15	3,78	4,26	4,65	3,69	4,11	3,13	3,62	3,00	3,39
	IV	02.05.2018 – 05.11.2019	2,61	3,41	2,70	3,07	2,55	3,37	2,85	3,43	2,63	3,38	3,20	3,70
	V	05.11.2019 – 21.02.2021	2,34	2,87	2,85	3,59	2,12	3,01	2,42	3,13	3,04	3,56	2,32	2,78
	VI	21.02.2021 – 30.03.2022	6,03	6,07	5,90	5,87	9,45	9,28	7,28	7,28	8,81	8,68	4,83	5,04

		Średnia	3,38	3,84	3,46	4,10	4,28	4,89	<b>3,74</b>	<b>4,33</b>	<b>4,01</b>	<b>4,52</b>	3,27	<b>3,68</b>
50	I	24.04.2015 – 30.04.2016	3,60	3,99	3,30	4,23	3,93	4,88	3,52	4,52	3,19	3,94	3,36	3,64
	II	30.04.2016 – 01.05.2017	2,95	3,50	3,09	3,90	2,95	3,93	3,31	4,07	3,30	3,90	3,21	3,74
	III	01.05.2017 – 02.05.2018	2,63	3,14	3,10	3,65	4,57	4,90	3,74	4,10	4,19	4,54	3,02	3,43
	IV	02.05.2018 – 05.11.2019	2,45	3,26	3,85	4,29	2,71	3,46	2,92	3,44	2,63	3,38	3,10	3,60
	V	05.11.2019 – 21.02.2021	2,34	2,84	4,30	4,65	2,39	3,12	2,65	3,28	3,04	3,56	2,96	3,36
	VI	21.02.2021 – 30.03.2022	5,55	5,63	7,02	6,97	8,71	8,66	7,09	7,11	8,26	8,20	4,99	5,18
		Średnia	3,25	3,73	4,11	4,61	<b>4,21</b>	4,82	3,87	4,42	4,10	4,59	3,44	3,82

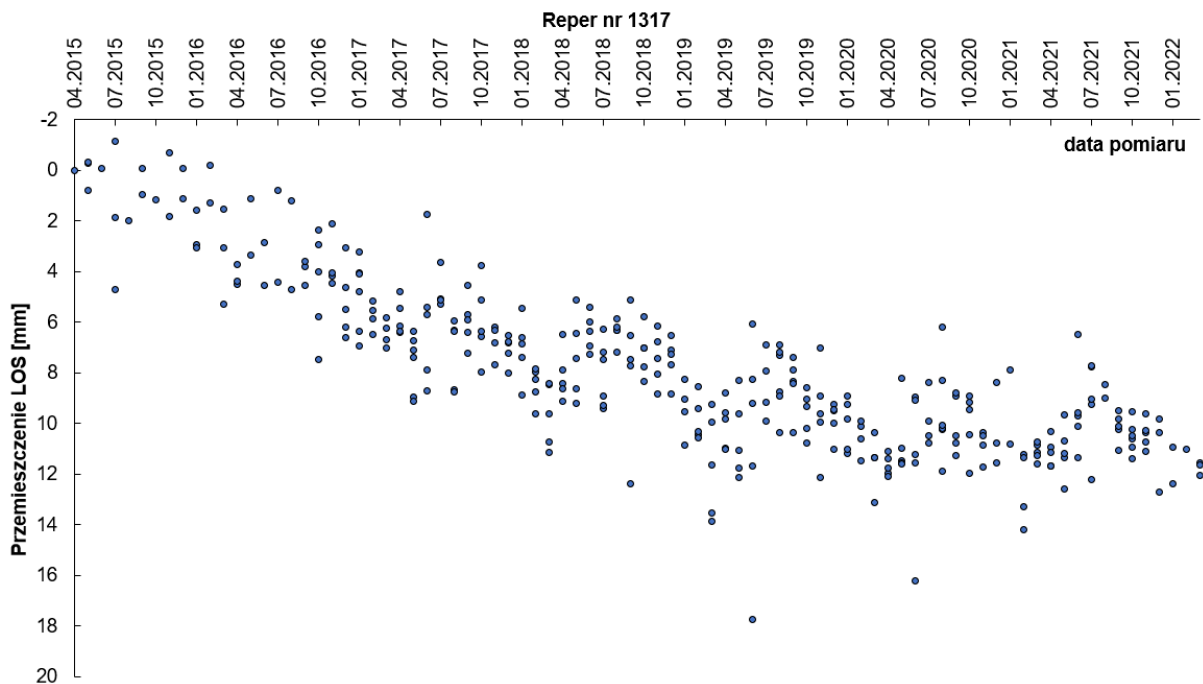
\*bd – brak danych lub zbyt mała ilość danych do obliczenia odchylenia standardowego

Jak wynika z tabeli 8.3 najmniejsze wartości średnich odchyłek standardowych zanotowano dla promienia równego 20 m i 40 m (po 5), przy czym w przypadku promienia równego 20 m w wielu przypadkach nie było możliwe obliczenie odchylenia standardowego, co wynika z faktu, że w promieniu tym nie zlokalizowano (lub zlokalizowano zbyt mało) punktów PS. Ponadto, analiza w przypadku promienia równego 40 m była prowadzona na większej liczbie danych (więcej punktów PS niż w przypadku promienia równego 20 m). W związku z tym do dalszych obliczeń i analiz przyjęto średni promień równy 40 m, co oznacza, że obniżenie w kierunku LOS danego repera pomiarowego (np. nr 1317), dla jednego okresu obliczeniowego, otrzymane w wyniku przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR zostało obliczone poprzez uśrednienie obniżeń ze wszystkich punktów PS znajdujących się w promieniu 40 m. Przykład przedstawiono na rysunku 8.17.

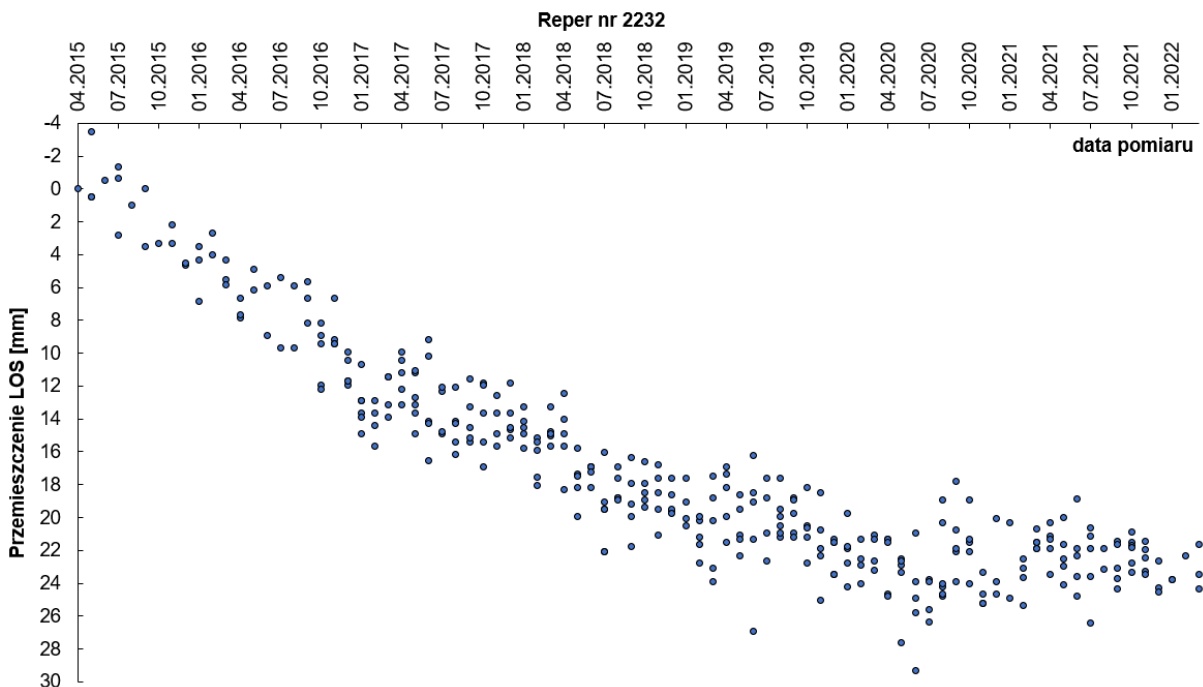


**Rys. 8.17.** Przykład wyznaczenia obniżenia w kierunku LOS repera nr 1317 z punktów PS otrzymanych na drodze obliczeń metodą PSInSAR: a) w okresie I tj. 24.04.2015 – 30.04.2016; b) w okresie II tj. 30.04.2016 – 01.05.2017 – układ PL2000/6, EPSG\_2177 (opracowanie własne).

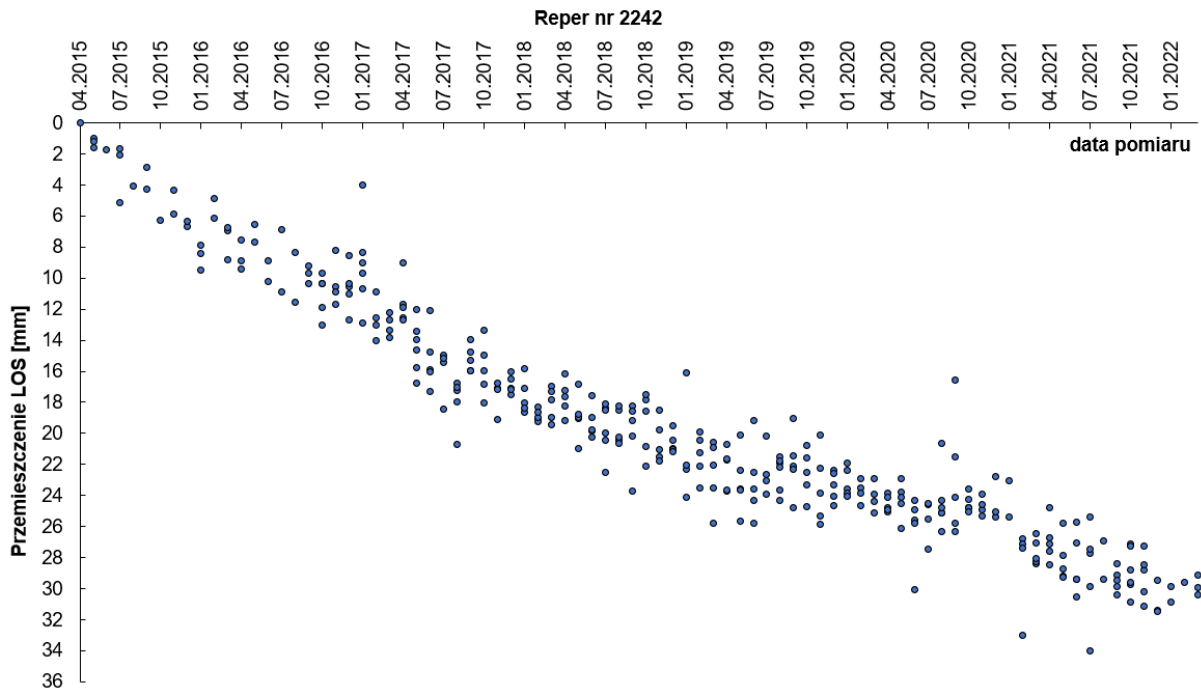
Znając obniżenie repera w kierunku LOS w jednym okresie obliczeniowym, zsumowano wyniki czego rezultatem jest obniżenie danego repera w całym analizowanym okresie – prawie 7 lat. Wyniki pokazano na rysunkach 8.18 – 8.23.



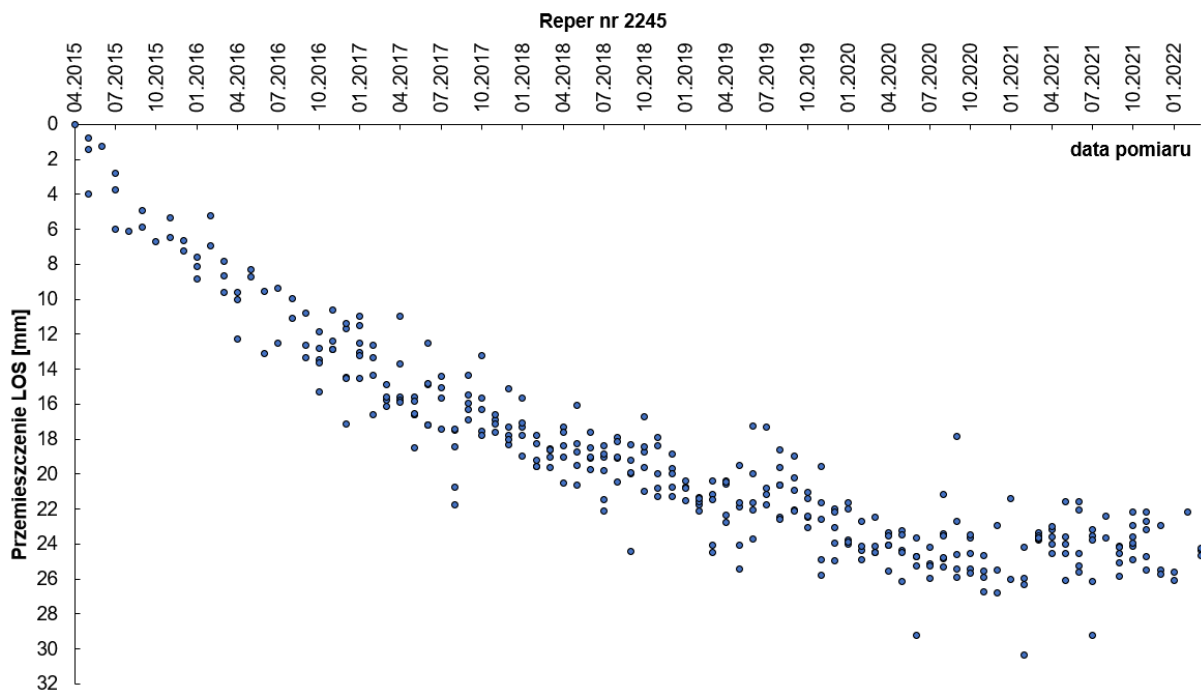
**Rys. 8.18.** Przeszyczenia w kierunku LOS [mm] punktu pomiarowego nr 1317 w okresie od 24.05.2015 do 30.03.2022 wyznaczone metodą PSInSAR (opracowanie własne).



**Rys. 8.19.** Przeszyczenia w kierunku LOS [mm] punktu pomiarowego nr 2232 w okresie od 24.05.2015 do 30.03.2022 wyznaczone metodą PSInSAR (opracowanie własne).

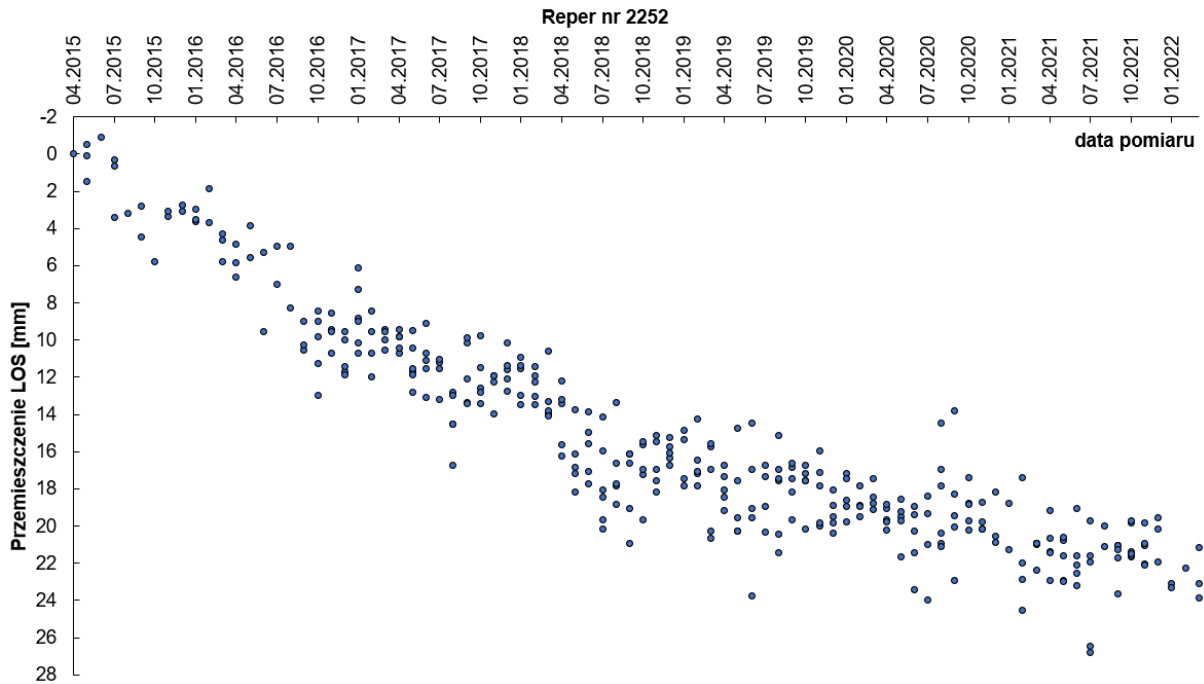


**Rys. 8.20.** Przemieszczenia w kierunku LOS [mm] punktu pomiarowego nr 2242 w okresie od 24.05.2015 do 30.03.2022 wyznaczone metodą PSInSAR (opracowanie własne).

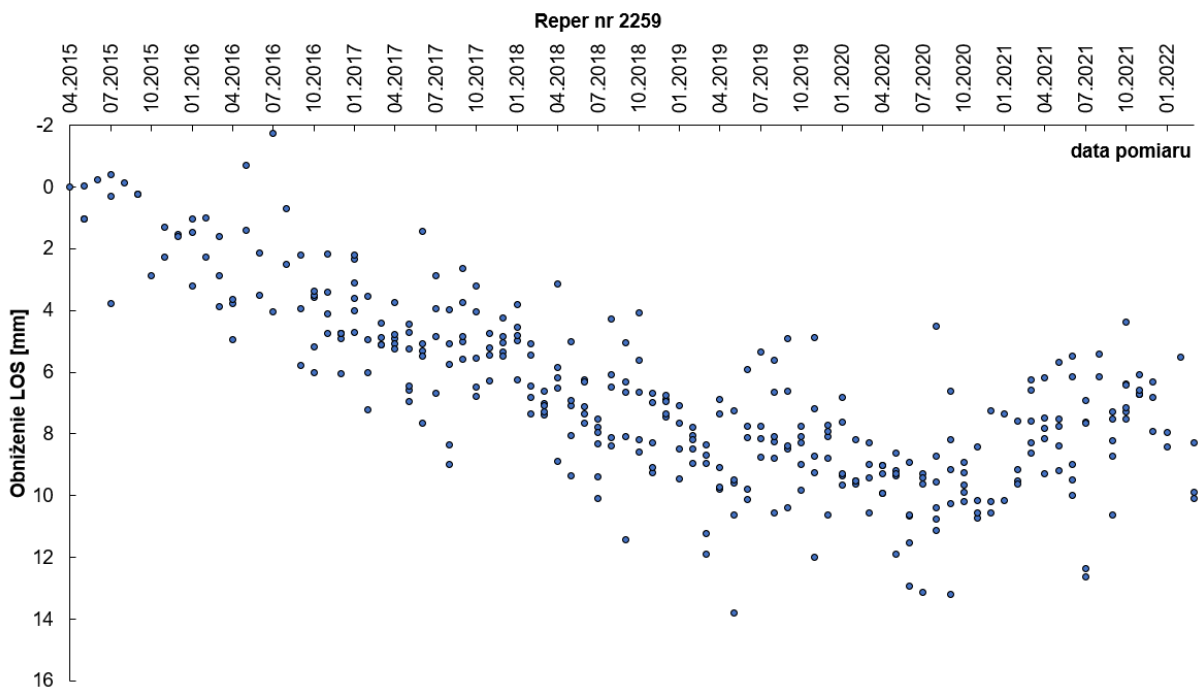


**Rys. 8.21.** Przemieszczenia w kierunku LOS [mm] punktu pomiarowego nr 2245 w okresie od 24.05.2015 do 30.03.2022 wyznaczone metodą PSInSAR (opracowanie własne).





**Rys. 8.22.** Przesunięcia w kierunku LOS [mm] punktu pomiarowego nr 2252 w okresie od 24.05.2015 do 30.03.2022 wyznaczone metodą PSInSAR (opracowanie własne).



**Rys. 8.23.** Obniżenia w kierunku LOS [mm] punktu pomiarowego nr 2259 w okresie od 24.05.2015 do 30.03.2022 wyznaczone metodą PSInSAR (opracowanie własne).

Z wykresów (rys. 8.18 – 8.23) wynika, że na przestrzeni 7 lat po zakończeniu eksploatacji, największemu obniżeniu równemu około 25-30 mm, uległy repery nr 2232, 2242, 2245 oraz 2252. Nieco mniejsze obniżenie miało miejsce na reperach nr 1317 i 2259 – około 10 mm. Związane jest to z lokalizacją reperów względem ostatniej eksploatacji prowadzonej w filarze ochronnym. Repery o większym obniżeniu są zlokalizowane bliżej ścian

eksploatacyjnych (patrz rozdział 8.1, rys. 8.1). Należy również zwrócić uwagę, iż na reperach nr 1317, 2232, 2245, 2252, 2259 w okolicach przełomu lat 2020/2021 widać pewne „wypłaszczenie” obniżeń. Można zatem sądzić, iż właśnie obniżenia na tych reperach ujawniały się jeszcze przez około 6 lat od zakończenia eksploatacji. Wyjątkiem jest reper nr 2242, na którym ewidentnie widać trend do dalszego obniżania się powierzchni.

Obniżenia w kierunku LOS w funkcji czasu zanotowane na 6 omawianych reperach w kolejnym kroku posłużyły do wyznaczenia współczynnika czasu  $c$  dla funkcji czasu Knothego. Podobnie jak w przypadku pomiarów geodezyjnych, wykorzystano algorytm opisujący zanikanie obniżeń metodą najmniejszych kwadratów. Ponieważ obniżenia powierzchni wyznaczono w oparciu o 343 zobrazowania SAR, rezultatem są skumulowane obniżenia w 343 cyklach, gdzie 1 cykl odpowiada 1 pomiarowi. Współczynnik czasu  $c$  wyznaczono 7-mio krotnie, w pierwszej kolejności ze wszystkich 343 pomiarów, następnie zmniejszono ilość pomiarów o 43 (do równych 300), później zmniejszono kolejno o równe 50 pomiarów odejmując je z początku cyklu pomiarowego. Wyznaczone współczynniki czasu wraz z odchyleniem standardowym przedstawiono w tabeli 8.4.

**Tab. 8.4.** Wyznaczone współczynniki czasu  $c$  z odchyleniem standardowym, dla poszczególnego repera, z pomiarów PSInSAR

Liczba pomiarów	Okres pomiarowy	Reper pomiarowy											
		1317		2232		2242		2245		2252		2259	
		$c$	$\sigma c$	$c$	$\sigma c$	$c$	$\sigma c$	$c$	$\sigma c$	$c$	$\sigma c$	$c$	$\sigma c$
343	24.05.2015 – 30.03.2022	0,35	1,6131	0,38	1,9089	0,20	1,8116	0,38	1,6483	0,29	1,7619	0,44	1,6960
300	02.11.2016 – 30.03.2022	0,42	1,6200	0,45	1,9323	0,22	1,8730	0,40	1,6882	0,32	1,7749	0,74	1,6829
250	16.09.2017 – 30.03.2022	0,60	1,6322	0,77	1,8643	bd*	bd	0,52	1,6307	0,45	1,8025	1,55	1,6604
200	19.07.2018 – 30.03.2022	1,62	1,6540	0,83	1,9269	bd	bd	0,73	1,7241	bd	bd	2,50	1,76
150	21.05.2019 – 30.03.2022	1,15	1,6357	2,25	1,9268	bd	bd	1,88	1,722	bd	bd	bd	bd
100	03.04.2020 – 30.03.2022	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd	bd
50	17.03.2021 – 30.03.2022	bd	bd	2,14	1,3281	1,25	1,5474	4,34	1,4020	1,76	1,5440	bd	bd

\*bd – brak danych – brak możliwości wyznaczenia współczynnika

Z tabeli 8.4 wynika, że większość współczynników została wyznaczona z większym błędem niż sama wartość współczynnika. Najbardziej wiarygodnym rezultatem jest współczynnik wyznaczony z 50 pomiarów na reperze nr 2245, który wyniósł 4,34 przy odchyleniu standardowym równym 1,4020 (co stanowi 32%), nie mniej jednak przy analizie obniżeń zmierzonych na 6 reperach i 7 okresów pomiarowych jedna wartość obciążona 32% błędem nie może stanowić wiarygodnego wyniku. Błędy w tej analizie wynikają przede wszystkim z charakterystyki przetwarzania zobrazowań metodą PSInSAR, która bardzo dobrze pokazuje

trend deformacji w skali globalnej, a więc na przestrzeni dłuższego okresu, podczas gdy sąsiednie cykle pomiarowe różnią się od siebie do kilku milimetrów. Dobrze jest to widoczne na wykresach (rys. 8.18 – 8.23), na których jest trend obniżenia na przestrzeni całego badanego okresu, obniżenie końcowe oraz wahania pomiędzy poszczególnymi cyklami.

W związku z powyższym kolejny etap badań przeprowadzono w oparciu o trend zmierzonych obniżenia. W tym celu na podstawie obniżenia wyznaczono modelowe wzory funkcji logarytmicznej, wielomianowej oraz potęgowej, które najlepiej opisywały wspomniany trend obniżenia. Dla oceny dopasowania funkcji do zmienności wyznaczonych obniżenia, dla każdej określono również współczynniki determinacji  $R^2$ . Wyniki tej analizy zamieszczono w tabeli 8.5.

**Tab. 8.5.** Wyznaczone modelowe funkcje opisujące trend obniżania się danego repera w czasie wraz z współczynnikiem determinacji.

Nr repera	Typ funkcji	Wzór	Współczynnik determinacji, $R^2$	Oznaczenie w tabeli 8.6
1317	Logarytmiczna	$f(x) = -2,782 \ln(x) + 5,5331$	0,7161	LOG <sub>1317</sub>
	Wielomianowa	$f(x) = 0,0001x^2 - 0,0629x - 1,3812$	0,7355	WIEL <sub>1317</sub>
	Potęgowa	$f(x) = 0,6664x^{0,4917}$	0,6836	POT <sub>1317</sub>
2232	Logarytmiczna	$f(x) = -6,128 \ln(x) + 12,468$	0,8800	LOG <sub>2232</sub>
	Wielomianowa	$f(x) = 0,0003x^2 - 0,1429x - 2,5942$	0,8984	WIEL <sub>2232</sub>
	Potęgowa	$f(x) = 0,9515x^{0,5757}$	0,8570	POT <sub>2232</sub>
2242	Logarytmiczna	$f(x) = -6,873 \ln(x) + 13,72$	0,8712	LOG <sub>2242</sub>
	Wielomianowa	$f(x) = 0,0001x^2 - 0,1192x - 5$	0,9203	WIEL <sub>2242</sub>
	Potęgowa	$f(x) = 1,2916x^{0,5403}$	0,9324	POT <sub>2242</sub>
2245	Logarytmiczna	$f(x) = -5,557 \ln(x) + 7,7866$	0,8972	LOG <sub>2245</sub>
	Wielomianowa	$f(x) = 0,0002x^2 - 0,1233x - 6,2639$	0,8890	WIEL <sub>2245</sub>
	Potęgowa	$f(x) = 2,1592x^{0,4365}$	0,8909	POT <sub>2245</sub>
2252	Logarytmiczna	$f(x) = -5,432 \ln(x) + 10,951$	0,8598	LOG <sub>2252</sub>
	Wielomianowa	$f(x) = 0,0002x^2 - 0,1093x - 3,1732$	0,8858	WIEL <sub>2252</sub>
	Potęgowa	$f(x) = 0,7622x^{0,5958}$	0,8768	POT <sub>2252</sub>
2259	Logarytmiczna	$f(x) = -2,27 \ln(x) + 4,2267$	0,6111	LOG <sub>2259</sub>
	Wielomianowa	$f(x) = 0,0001x^2 - 0,0668x - 0,636$	0,6824	WIEL <sub>2259</sub>
	Potęgowa	$f(x) = 0,4577x^{0,5304}$	0,5518	POT <sub>2259</sub>

Jak wynika z tabeli 8.5 dla funkcji wyznaczonych z obniżenia zmierzonych na reperach nr 2232, 2242, 2245 oraz 2252 współczynnik determinacji jest większy od 0,85. Mniejsze wartości dotyczą reperów 2259 i 1317, które kształtują się w przedziale 0,55-0,73. Związane jest to z większym rozproszeniem wyników obniżenia wyznaczonych metodą PSInSAR na tych reperach (rys. 8.5, 8.10). Do zobrazowania trendu obniżenia, wykorzystano również średnią ruchomą, w której wartości uśredniono na 2 sposoby:

(1). W okresie pomiarowym między 24.05.2015 – 09.2016 uśredniono wyniki z 3 pomiarów, ponieważ średnia ilość zobrazowań na miesiąc wynosiła 3, a w okresie 10.2016 – 03.2022 uśredniono wyniki z 5 pomiarów, ponieważ średnia ilość zobrazowań na miesiąc wynosiła 5.

(2). W całym okresie pomiarowym uśredniono wyniki dla każdego miesiąca – zabieg ten zmniejszył ilość cykli pomiarowych z 343 do 84.

W oparciu o modelowe funkcje trendu obniżen oraz wyniki uśrednione w interwałach miesięcznych, dla każdego analizowanego repera, wyznaczono współczynniki czasu  $c$ . Wyniki zestawiono w tabeli 8.6.

**Tab. 8.6.** Wyznaczone współczynniki czasu  $c$  na podstawie modelowych funkcji trendu określonych z obniżen wyznaczonych metodą PSInSAR.

Nr repera	Liczba pomiarów	Okres pomiarowy	Modelowa funkcja trendu									
			LOG		WIEL		POT		Śr. Ruchoma (1)		Śr. Ruchoma (2)	
			$c$	$\frac{\sigma c}{\sigma c, \%}$	$c$	$\frac{\sigma c}{\sigma c, \%}$	$c$	$\frac{\sigma c}{\sigma c, \%}$	$c$	$\sigma c$	$c$	$\sigma c$
1317	343 (84)**	24.05.2015 – 30.03.2022	0,51	0,2773 54,4	0,25	0,4295 171,8	0,18	0,0961 53,4	0,35	0,988	0,33	1,0123
	300 (65)	02.11.2016 – 30.03.2022	0,41	0,0496 12,1	0,48	0,153 31,9	0,21	0,0248 11,8	0,42	0,9955	0,41	1,0214
	250 (55)	16.09.2017 – 30.03.2022	0,34	0,0153 4,5	0,62	0,1016 16,4	0,2	0,0178 8,9	0,63	1,0024	0,52	1,0451
	200 (45)	19.07.2018 – 30.03.2022	0,31	0,0103 3,3	0,82	0,0674 8,2	0,19	0,0193 10,2	0,38	1,0263	1,43	1,0028
	150 (35)	21.05.2019 – 30.03.2022	0,3	0,0114 3,8	1,22	0,0410 3,4	0,2	0,0217 10,9	1,16	0,9151	0,43	0,962
	100 (24)	03.04.2020 – 30.03.2022	0,27	0,0131 4,9	2,4	0,0231 1,0	0,18	0,0257 14,3	bd	bd	bd	bd
	50 (13)	17.03.2021 – 30.03.2022	<b>0,84</b>	<b>0,0081</b> <b>1,0</b>	bd*	bd	<b>0,77</b>	<b>0,0166</b> <b>2,2</b>	bd	bd	bd	bd
2232	343 (84)	24.05.2015 – 30.03.2022	0,51	0,6108 119,8	0,48	1,3774 287,0	0,13	0,2537 195,2	0,38	1,1613	0,36	1,1456
	300 (65)	02.11.2016 – 30.03.2022	0,41	0,1093 26,7	1,02	0,8711 85,4	0,18	0,0527 29,3	0,44	1,1543	0,44	1,1433
	250 (55)	16.09.2017 – 30.03.2022	0,34	0,0337 9,9	1,72	0,7998 46,5	0,17	0,0474 27,9	0,76	1,0146	0,68	1,0339
	200 (45)	19.07.2018 – 30.03.2022	0,31	0,0227 7,3	4,1	0,8203 20,0	0,17	0,0523 30,8	0,78	1,0703	0,8	1,0231
	150 (35)	21.05.2019 – 30.03.2022	0,3	0,025 8,3	bd	bd	0,18	0,0586 32,6	2,08	1,0601	2,02	0,9827
	100 (24)	03.04.2020 – 30.03.2022	0,27	0,0289 10,7	bd	bd	0,17	0,0695 40,9	bd	bd	bd	bd

	50 (13)	17.03.2021 – 30.03.2022	<b><u>0,84</u></b>	<b><u>0,0178</u></b> <b><u>2,1</u></b>	bd	bd	<b><u>0,76</u></b>	<b><u>0,0452</u></b> <b><u>5,9</u></b>	bd	bd	bd	bd
2242	343 (84)	24.05.2015 – 30.03.2022	0,51	0,6851 134,3	bd	bd	0,15	0,2618 174,5	0,2	1,0914	0,2	1,0965
	300 (65)	02.11.2016 – 30.03.2022	0,41	0,1226 29,9	0,17	0,1376 80,9	0,19	0,0602 31,7	0,22	1,1346	0,19	1,1396
	250 (55)	16.09.2017 – 30.03.2022	0,34	0,0378 11,1	0,2	0,0866 43,3	0,18	0,0495 27,5	bd	bd	bd	bd
	200 (45)	19.07.2018 – 30.03.2022	0,31	0,0254 8,2	0,23	0,0721 31,3	0,18	0,0543 30,2	bd	bd	bd	bd
	150 (35)	21.05.2019 – 30.03.2022	0,3	0,0281 9,4	0,26	0,0703 27,0	0,19	0,0610 32,1	bd	bd	bd	bd
	100 (24)	03.04.2020 – 30.03.2022	0,27	0,0324 12,0	0,26	0,0828 31,8	0,17	0,0723 42,5	bd	bd	bd	bd
	50 (13)	17.03.2021 – 30.03.2022	<b><u>0,84</u></b>	<b><u>0,0200</u></b> <b><u>2,4</u></b>	0,86	0,0511 5,9	<b><u>0,77</u></b>	<b><u>0,0469</u></b> <b><u>6,1</u></b>	0,49	0,5278	bd	bd
2245	343 (84)	24.05.2015 – 30.03.2022	0,51	0,5539 108,6	0,26	0,8556 329,1	0,21	0,2326 110,8	0,38	0,9244	0,39	1,0341
	300 (65)	02.11.2016 – 30.03.2022	0,41	0,0991 24,2	0,5	0,3162 63,2	0,23	0,6220 270,4	0,39	0,9615	0,4	1,0459
	250 (55)	16.09.2017 – 30.03.2022	0,34	0,0306 9,0	0,65	0,2138 32,9	0,21	0,0383 18,2	0,51	0,9049	0,45	1,0813
	200 (45)	19.07.2018 – 30.03.2022	0,31	0,0205 6,6	0,88	0,145 16,5	0,2	0,0404 20,2	0,71	0,9546	0,76	1,0458
	150 (35)	21.05.2019 – 30.03.2022	0,3	0,0227 7,6	1,37	0,0931 6,8	0,21	0,0457 21,8	1,71	0,9337	1,51	1,0608
	100 (24)	03.04.2020 – 30.03.2022	0,27	0,0262 9,7	3,05	0,0607 2,0	0,19	0,0539 28,4	5,28	0,8354	5,03	1,0043
	50 (13)	17.03.2021 – 30.03.2022	<b><u>0,84</u></b>	<b><u>0,0161</u></b> <b><u>1,9</u></b>	bd	bd	<b><u>0,78</u></b>	<b><u>0,0346</u></b> <b><u>4,4</u></b>	4,02	0,5695	bd	bd
2252	343 (84)	24.05.2015 – 30.03.2022	0,51	0,5414 106,2	0,34	0,8572 252,1	0,13	0,2287 175,9	0,29	1,0456	0,27	1,0708
	300 (65)	02.11.2016 – 30.03.2022	0,41	0,0969 23,6	0,68	0,4028 59,2	0,17	0,0475 27,9	0,31	1,0394	0,27	0,9948
	250 (55)	16.09.2017 – 30.03.2022	0,34	0,0299 8,8	0,97	0,3101 32,0	0,17	0,0442 26,0	0,48	1,031	0,34	1,0066
	200 (45)	19.07.2018 – 30.03.2022	0,31	0,0201 6,5	1,57	0,2527 16,1	0,17	0,0487 28,6	bd	bd	bd	bd
	150 (35)	21.05.2019 – 30.03.2022	0,3	0,0222 7,4	3,59	0,237 6,6	0,18	0,0546 30,3	bd	bd	bd	bd
	100 (24)	03.04.2020 – 30.03.2022	0,27	0,0256 9,5	bd	bd	0,16	0,0648 40,5	0,2	1,0095	bd	bd
	50 (13)	17.03.2021 – 30.03.2022	<b><u>0,84</u></b>	<b><u>0,0158</u></b> <b><u>1,9</u></b>	bd	bd	<b><u>0,76</u></b>	<b><u>0,0422</u></b> <b><u>5,6</u></b>	1,39	0,7601	bd	bd

2259	343 (84)	24.05.2015 – 30.03.2022	0,51	0,2263 44,4	0,22	0,4374 198,8	0,16	0,0862 53,9	0,44	1,0814	0,43	1,1885
	300 (65)	02.11.2016 – 30.03.2022	0,41	0,0405 9,9	0,42	0,1405 33,5	0,19	0,0204 10,7	0,72	1,0541	0,74	1,141
	250 (55)	16.09.2017 – 30.03.2022	0,34	0,0125 3,7	0,53	0,0890 16,8	0,18	0,0163 9,1	1,56	0,9924	1,36	1,1337
	200 (45)	19.07.2018 – 30.03.2022	0,31	0,0084 2,7	0,67	0,0561 8,4	0,18	0,0178 9,9	2,37	1,0705	2,61	1,1675
	150 (35)	21.05.2019 – 30.03.2022	0,30	0,0093 3,1	0,91	0,0301 3,3	0,19	0,0201 10,6	bd	bd	bd	bd
	100 (24)	03.04.2020 – 30.03.2022	0,27	0,0107 4,0	1,39	0,0135 1,0	0,18	0,0238 13,2	bd	bd	bd	bd
	50 (13)	17.03.2021 – 30.03.2022	<u>0,84</u>	<u>0,0066</u> <u>0,8</u>	3,85	0,0045 0,1	<u>0,77</u>	<u>0,0154</u> <u>2,0</u>	bd	bd	bd	bd

\*bd – brak danych – brak możliwości wyznaczenia współczynnika

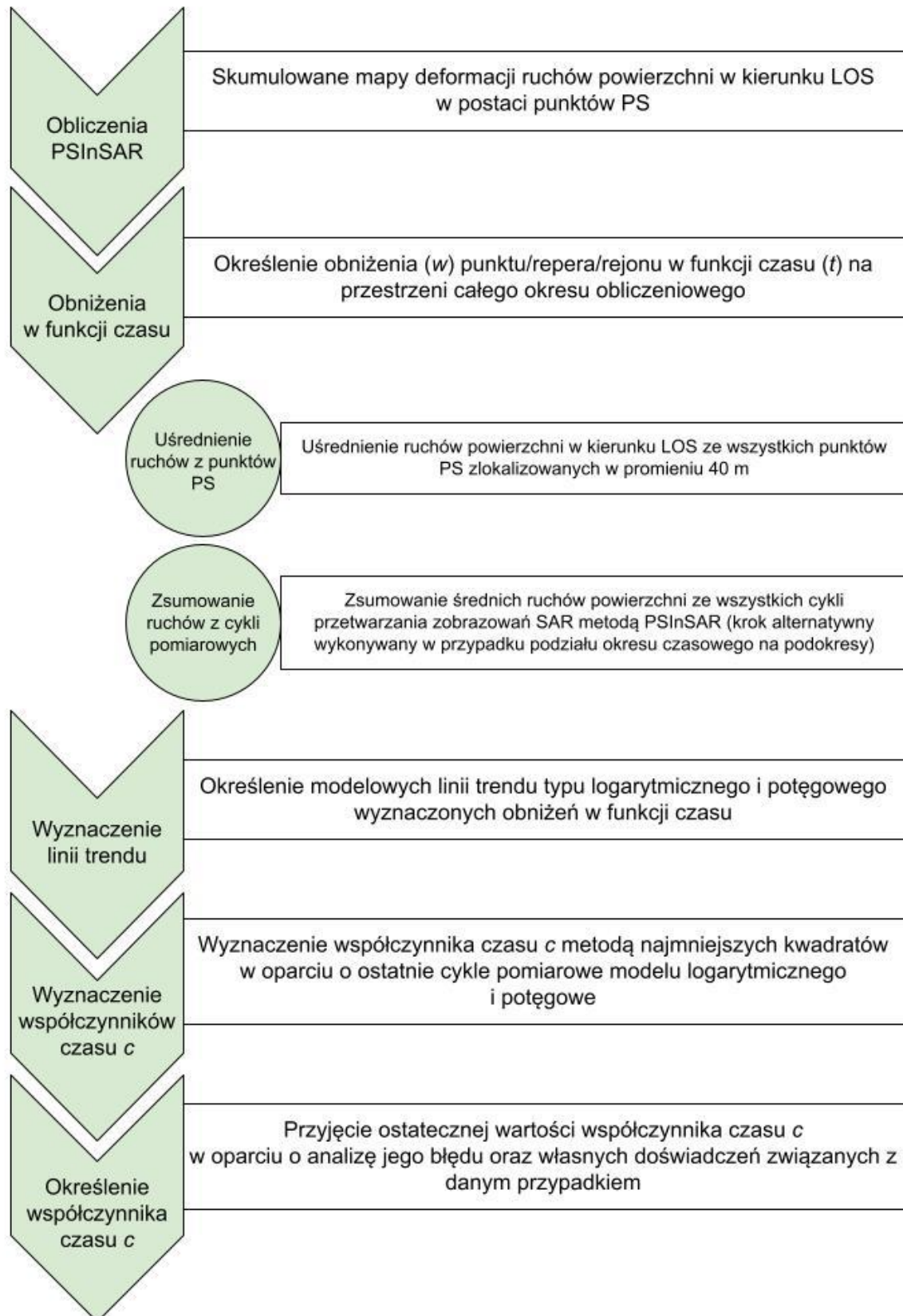
\*\* (84) - ilość pomiarów branych pod uwagę przy wyznaczeniu współczynnika na podstawie średniej ruchomej (2)

Na podstawie otrzymanych wyników, w pierwszej kolejności można stwierdzić, że współczynnika czasu  $c$  nie powinno się wyznaczać w oparciu o średnią ruchomą obliczoną dla miesięcznych okresów. Wyznaczone współczynniki obarczone są bardzo dużymi błędami (niejednokrotnie większymi od samej wartości współczynnika). Odwrotna sytuacja występuje w przypadku współczynników obliczonych z 3 modelowych funkcji trendu. Jest to naturalne, ponieważ same linie trendu są generalizacją wyników. Najmniejszymi błędami obarczone są współczynniki wyznaczone z ostatnich 50 pomiarów. Ich wartości nie przekraczają 6% wartości współczynnika czasu  $c$ . Pozostałe wyniki obarczone są już większymi błędami na poziomie od 10 nawet do 330%. Podobnie jest również w przypadku pomiarów geodezyjnych wykonywanych jeszcze w trakcie eksploatacji. Współczynnik wyznacza się na podstawie ostatnich cykli pomiarowych, ponieważ 80% wpływów wywołanych eksploatacją to wpływy prawie natychmiastowe, które ujawniają się jeszcze w trakcie eksploatacji. Pozostałe 20% są rozłożone w dłuższym okresie czasu na końcowy etap eksploatacji i po jej zakończeniu i na ich podstawie do tej pory określany jest współczynnik czasu  $c$  (Kowalski 2007). Określenie współczynnika czasu  $c$  z 50 ostatnich pomiarów funkcji wielomianowej było możliwe tylko dla 2 na 6 reperów, co wskazuje, że akurat z tego modelu w większości przypadków może nie być to możliwe. Zostają zatem 2 modelowe funkcje: logarytmiczna i potęgowa. Średni procent błęd wyznaczonego współczynnika czasu  $c$  z ostatnich 50 pomiarów funkcji logarytmicznej wyniósł 1,7%, a z funkcji potęgowej 4,4 %. Mogłoby to wskazywać bardziej na model logarytmiczny, nie mniej jednak średni błąd rzędu ok. 4 % jest bardzo mały i nie może dyskwalifikować modelu potęgowego. W związku z tym, można stwierdzić, że oba modele są

poprawne, a ostateczny wybór między nimi powinien być dokonany w oparciu o błąd wyniku (czyli odchylenie standardowe) lub własne doświadczenia związane ze znajomością górotworu i eksploatacji. Podsumowując rozważania dotyczące modelowych funkcji trendu można stwierdzić że:

1. Współczynnik czasu  $c$  powinien być wyznaczany w oparciu o końcowe cykle pomiarowe (w powyższym przykładzie 50 cykli na przestrzeni 1 roku).
2. Współczynnik czasu  $c$  może być wyznaczany z modelowych linii trendu obniżen typu logarytmicznego lub potęgowego.
3. Wybór pomiędzy modelem logarytmicznym, a potęgowym powinien być dokonany na podstawie wartości błędu współczynnika lub własnych doświadczeń związanych ze znajomością górotworu.

Podsumowując przedstawioną analizę do wyznaczania współczynnika czasu  $c$  dla funkcji Knothe'go proponuje się następującą metodykę przedstawioną na rysunku 8.24.



**Rys. 8.24.** Metoda wyznaczania współczynnika czasu  $c$  z obniżeń w kierunku LOS, uzyskanych z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR (opracowanie własne)



### 8.2.2. Określenie teoretycznego czasu zanikania deformacji w oparciu o pomiary InSAR

W celu określenia czasu zanikania deformacji w oparciu o pomiary InSAR w pierwszej kolejności należało wyznaczyć współczynnik czasu  $c$ . Wykorzystano metodykę opisaną w rozdziale 8.2.1. Współczynnik czasu określono z obniżeń wyznaczonych metodą PSInSAR dla reperów nr 1317, 2232, 2242, 2245, 2252, 2259. Wyniki przedstawiono w tabeli 8.7.

**Tab. 8.7.** Współczynniki czasu  $c$ , określone na podstawie obniżeń w kierunku LOS wyznaczonych metodą PSInSAR.

Nr repera	Liczba pomiarów	Okres pomiarowy	Model logarytmiczny		Model potęgowy	
			$c$	$\sigma_c$ $\sigma_c, \%$	$c$	$\sigma_c$ $\sigma_c, \%$
1317	50	17.03.2021 – 30.03.2022	0,84	0,0081 1,0	0,77	0,0166 2,2
2232			0,84	0,0178 2,1	0,76	0,0452 5,9
2242			0,84	0,0200 2,4	0,77	0,0469 6,1
2245			0,84	0,0161 1,9	0,78	0,0346 4,4
2252			0,84	0,0158 1,9	0,76	0,0422 5,6
2259			0,84	0,0066 0,8	0,77	0,0154 2,0
Średnia			<b><u>0,84</u></b>	<b><u>0,0141</u></b> <b><u>1,7</u></b>	0,77	0,0335 4,4

Jak wynika z tabeli 8.7, średni współczynnik czasu  $c$  według modelu logarytmicznego i potęgowego wyniósł odpowiednio 0,84 i 0,77. Z uwagi na małą różnicę obydwie wartości mogłyby być wykorzystane w dalszych obliczeniach. Również odchylenie standardowe w obu przypadkach jest na bardzo niskim poziomie i wynosi odpowiednio 1,7% i 4,4%. Błąd wyznaczenia współczynnika z modelu logarytmicznego jest o około 2% mniejszy i to właśnie z tego powodu do kolejnych obliczeń przyjęto współczynnik czasu  $c$  równy 0,84. Na uwagę zasługuje również fakt stabilności współczynnika, ponieważ jego wartość określona z obniżeń na wszystkich reperach jest analogiczna w przypadku modelu logarytmicznego i różni się tylko o 0,02 w przypadku modelu potęgowego. Może to wynikać z liczebności pomiarów, na podstawie których został wyznaczony. Większa liczba pomiarów pozwala dokładniej odwzorować kształtowanie się obniżeń w czasie. W przypadku klasycznych metod geodezyjnych pomiary musiałyby być wykonywane średnio co 7-8 dni przez cały rok.

Przyjmując założenie, że 99% wpływów już się ujawniło (założenie takie same jak w przypadku wyznaczenia współczynnika z pomiarów geodezyjnych – patrz rozdział 8.1), teoretyczny czas zanikania obniżeń określony na podstawie pomiarów PSInSAR wynosi (8.3):

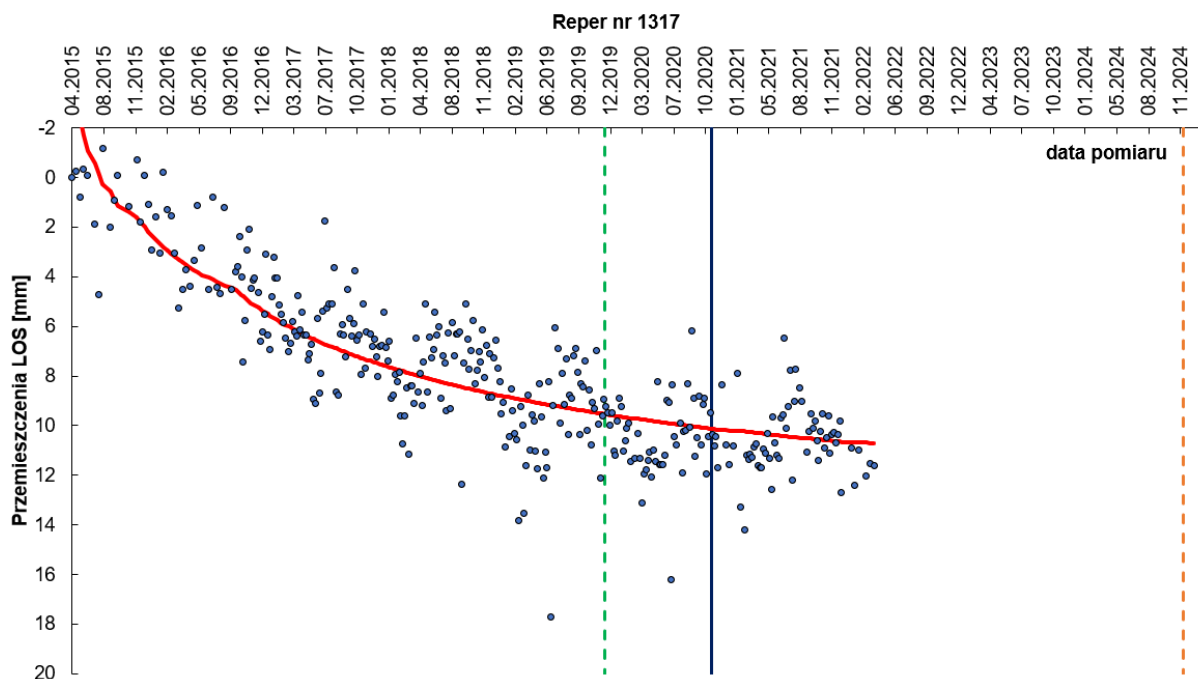
$$t = -\frac{1}{c} \ln \left( 1 - \frac{\Delta w}{w_{as}} \right) = -\frac{1}{c} \ln(0,01) = 5,48 \approx 5 \text{ lat } 6 \text{ miesięcy} \quad (8.3)$$

### 8.3. Analiza porównawcza wyników uzyskanych na podstawie pomiarów geodezyjnych i pomiarów InSAR

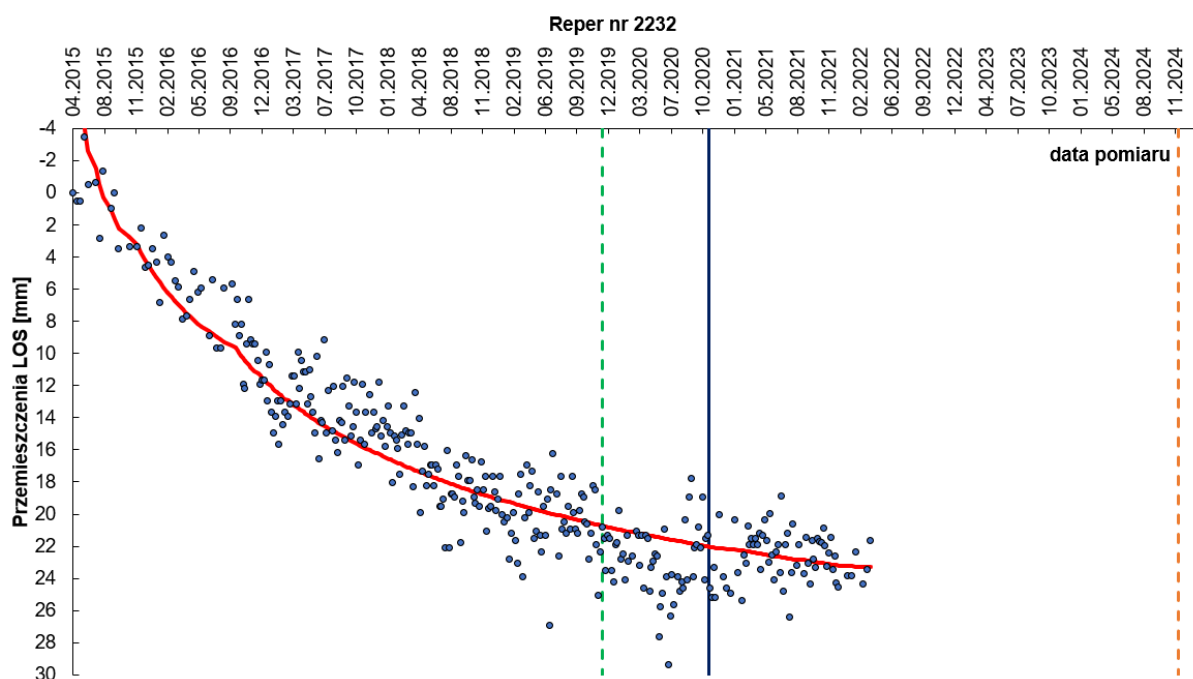
Na podstawie pomiarów obniżenia powierzchni spowodowanych eksploatacją górnictwem w filarze ochronnym Śródmieścia Bytomia wyznaczono 3 teoretyczne czasy zanikania tych obniżenia po zakończeniu eksploatacji. W dwóch pierwszych wykorzystano pomiary wykonane klasycznymi metodami geodezyjnymi przed i po zakończeniu eksploatacji. Trzeci czas zanikania określono w oparciu o pomiary wykonane technologią InSAR, również po zakończeniu eksploatacji. Uzyskane wyniki podsumowano w tabeli 8.8, natomiast porównanie wyników przedstawiono na wykresach obrazujących przemieszczenia powierzchni w kierunku LOS wyznaczone z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR (rys. 8.25 – 8.30).

**Tab. 8.8.** Czasu zanikania obniżenia w rejonie filara ochronnego Śródmieścia Bytomia wyznaczone na drodze przeprowadzonej analizy.

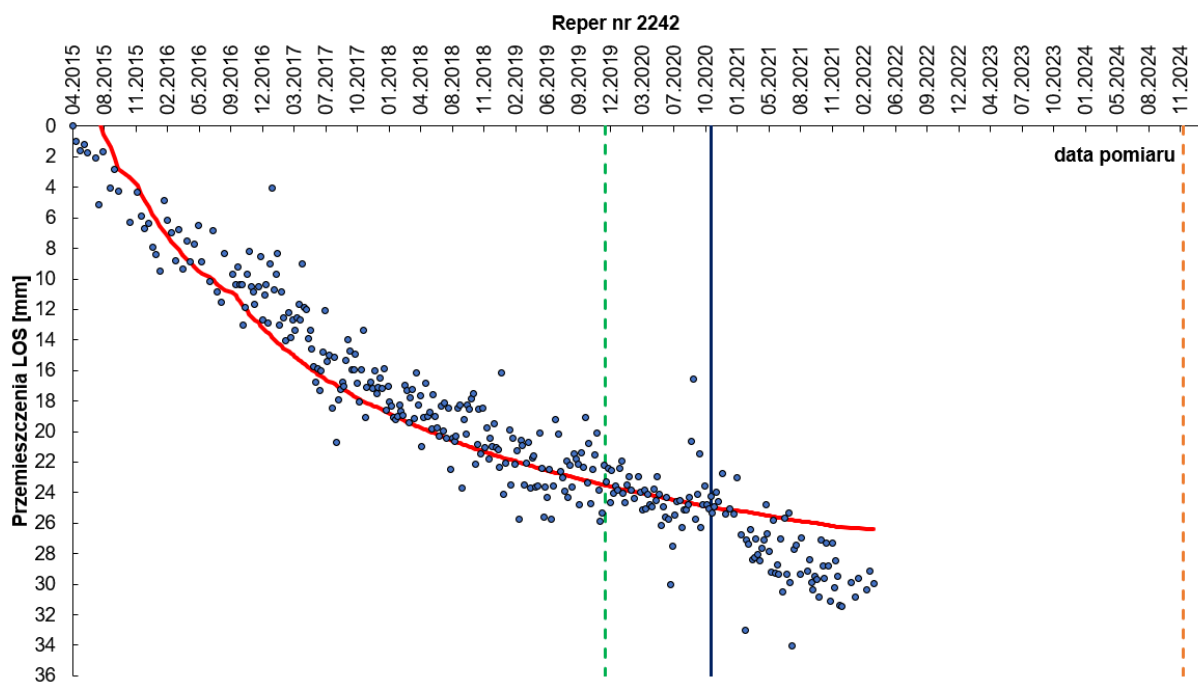
L.p.	Typ zastosowanych pomiarów	Zastosowany współczynnik czasu $c$	Teoretyczny czas zanikania obniżenia	Teoretyczna data zaprzestania ujawniania się obniżenia
1	Geodezyjne wykonywane w trakcie eksploatacji	1,01	4 lata 7 miesięcy	Grudzień 2019
2	Geodezyjne wykonywane po zakończeniu eksploatacji	0,48	9 lat 7 miesięcy	Grudzień 2024
3	InSAR wykonane po zakończeniu eksploatacji	0,84	5 lat 6 miesięcy	Listopad 2020



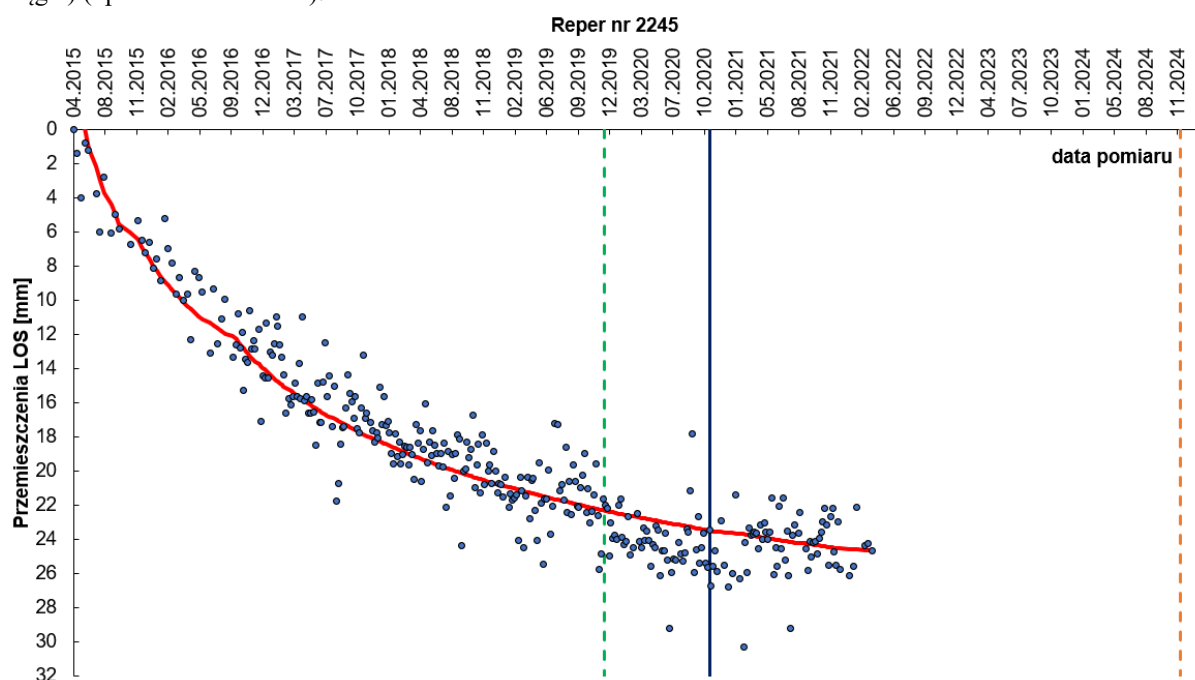
**Rys 8.25.** Przeszyczenia w kierunku LOS w funkcji czasu, na reperze nr 1317, wyznaczone metodą PSInSAR wraz z logarytmiczną linią trendu obniżeń (linia czerwona) oraz teoretycznym czasem zanikania deformacji: a) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane w trakcie eksploatacji (linia zielona przerywana); b) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane po zakończeniu eksploatacji (linia pomarańczowa przerywana); c) określonym w oparciu i pomiary InSAR wykonane po zakończeniu eksploatacji (linia granatowa ciągła) (opracowanie własne).



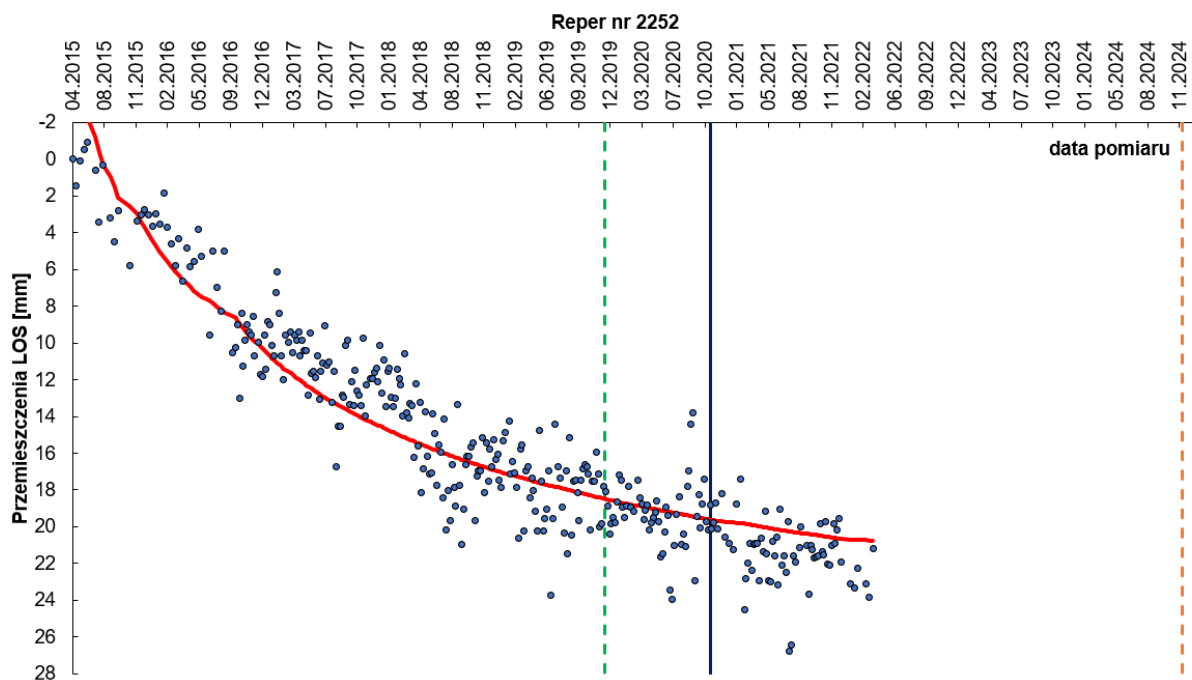
**Rys. 8.26.** Przeszyczenia w kierunku LOS w funkcji czasu, na reperze nr 2232, wyznaczone metodą PSInSAR wraz z logarytmiczną linią trendu obniżeń (linia czerwona) oraz teoretycznym czasem zanikania deformacji: a) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane w trakcie eksploatacji (linia zielona przerywana); b) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane po zakończeniu eksploatacji (linia pomarańczowa przerywana); c) określonym w oparciu i pomiary InSAR wykonane po zakończeniu eksploatacji (linia granatowa ciągła) (opracowanie własne).



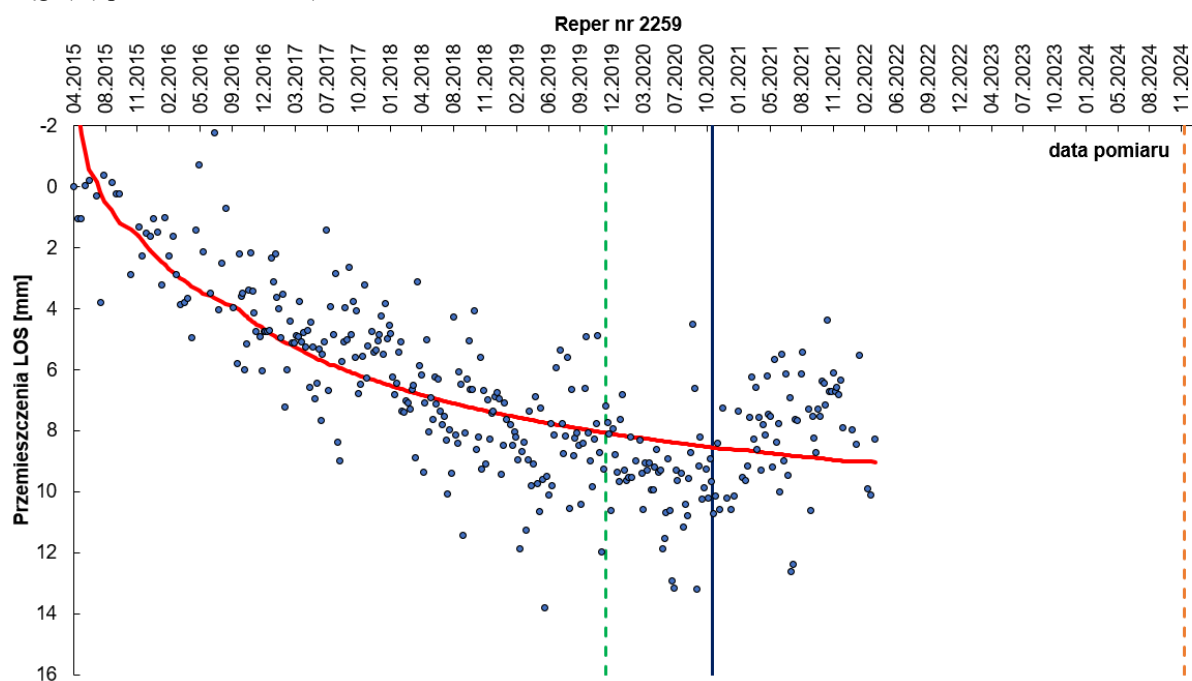
**Rys. 8.27.** Przemieszczenia w kierunku LOS w funkcji czasu, na reperze nr 2242, wyznaczone metodą PSInSAR wraz z logarytmiczną linią trendu obniżenia (linia czerwona) oraz teoretycznym czasem zanikania deformacji: a) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane w trakcie eksploatacji (linia zielona przerywana); b) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane po zakończeniu eksploatacji (linia pomarańczowa przerywana); c) określonym w oparciu o pomiary InSAR wykonane po zakończeniu eksploatacji (linia granatowa ciągła) (opracowanie własne).



**Rys. 8.28.** Przemieszczenia w kierunku LOS w funkcji czasu, na reperze nr 2245, wyznaczone metodą PSInSAR wraz z logarytmiczną linią trendu obniżenia (linia czerwona) oraz teoretycznym czasem zanikania deformacji: a) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane w trakcie eksploatacji (linia zielona przerywana); b) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane po zakończeniu eksploatacji (linia pomarańczowa przerywana); c) określonym w oparciu o pomiary InSAR wykonane po zakończeniu eksploatacji (linia granatowa ciągła) (opracowanie własne).



**Rys. 8.29.** Przemieszczenia w kierunku LOS w funkcji czasu, na reperze nr 2252, wyznaczone metodą PSInSAR wraz z logarytmiczną linią trendu obniżenia (linia czerwona) oraz teoretycznym czasem zanikania deformacji: a) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane w trakcie eksploatacji (linia zielona przerywana); b) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane po zakończeniu eksploatacji (linia pomarańczowa przerywana); c) określonym w oparciu o pomiary InSAR wykonane po zakończeniu eksploatacji (linia granatowa ciągła) (opracowanie własne).



**Rys. 8.30.** Przemieszczenia w kierunku LOS w funkcji czasu, na reperze nr 2259, wyznaczone metodą PSInSAR wraz z logarytmiczną linią trendu obniżenia (linia czerwona) oraz teoretycznym czasem zanikania deformacji: a) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane w trakcie eksploatacji (linia zielona przerywana); b) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane po zakończeniu eksploatacji (linia pomarańczowa przerywana); c) określonym w oparciu o pomiary InSAR wykonane po zakończeniu eksploatacji (linia granatowa ciągła) (opracowanie własne).

Na podstawie wykresów (rys. 8.25 – 8.30) można stwierdzić, że czas wynoszący 9 lat i 7 miesięcy wyznaczony z pomiarów geodezyjnych wykonywanych po zakończeniu eksploatacji budzi wątpliwości, gdyż obniżenia wyznaczone do dnia 30.03.2022 wskazują, że powierzchnia jest względnie uspokojona. Wynika to z faktu, że po zakończeniu eksploatacji wykonano tylko 5 cykli pomiarowych przez 3,5 roku. Z tych pomiarów wyznaczono współczynnik czasu  $c$  ale nie było możliwe określenie jego błędu.

Na szczególną uwagę zasługują pozostałe 2 okresy. Na wykresach widoczne jest, że po pierwszej dacie granicznej to jest 12.2019 r., występują niewielkie obniżenia. Po drugiej dacie granicznej to jest 11.2020 również występują obniżenia ale znacznie mniejsze niż w pierwszym przypadku. Wyjątkiem jest reper nr 2242, na którym po 11.2020 następuje znaczące obniżenie się powierzchni. Ponadto widać pewną rozbieżność pomiędzy surowymi wynikami, a ich modelem logarytmicznym.

Uwzględniając powyższe, można przyjąć, że **obniżenia wyznaczone metodą PSInSAR mogą służyć do określania teoretycznego czasu zanikania deformacji powierzchni na terenach pogórnich po zakończeniu eksploatacji**. Ponadto, wykorzystanie tych obniżeń do wyznaczenia współczynnika czasu  $c$ , pozwoliło na dokładniejsze określenie teoretycznego czasu zanikania deformacji, co potwierdza faktyczne obniżanie się powierzchni. Na podstawie rozkładu narastania deformacji powierzchni w długim okresie czasu wyznaczonym z przetwarzania obrazów SAR metodą PSInSAR, można również stwierdzić, że możliwe jest występowanie tak zwanych deformacji rezydualnych (resztkowych).

Podsumowując, badania dotyczące czasu zanikania deformacji po zakończeniu eksploatacji pozwalają na przedstawienie następujących wniosków:

1. Wyznaczony czas zanikania deformacji w oparciu o pomiary InSAR jest analogiczny z faktycznym obniżaniem się powierzchni.
2. Wyznaczone obniżenia metodą PSInSAR mogą służyć do określania teoretycznego czasu zanikania deformacji na terenach pogórnich, co wskazuje na aplikacyjny charakter badań.

Efektom badań jest:

1. Opracowanie metodyki wyznaczania współczynnika czasu  $c$  z pomiarów InSAR oraz czasu zaniku deformacji.

## 9. Wnioski

Górnośląskie Zagłębie Węglowe jest doświadczonym, wieloletnią i wielopokładową eksploatacją, poligonem badawczym, na którym zachodzi szereg procesów związanych z deformacjami powierzchni.

Badania dotyczące możliwości wykrywania dużych deformacji z wykorzystaniem interferometrii satelitarnej pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- 1) Metoda SBAS nie powinna być stosowana w klasycznej, obecnie dostępnej postaci do wykrywania deformacji na obszarze GZW - analiza porównawcza obniżeń otrzymanych z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS i obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi wykazała duże wartości RMSE.
- 2) Istnieje zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a niedoszacowaniem obniżeń otrzymanych z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS do obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi. Niedoszacowanie jest wprost proporcjonalne do prędkości obniżania się powierzchni – analiza wykazała korelację na poziomie większym od 0,8946. Zależność nie jest jednoznaczna dla całego GZW, a dla poszczególnych rejonów, a nawet okresów pomiarowych.
- 3) Opracowano nową metodę wyznaczania dużych obniżeń powierzchni z wykorzystaniem metody SBAS, zwaną metodą zależności liniowych. Walidacja metody potwierdziła jej skuteczność i możliwość wykorzystania w praktyce do określania dowolnych wartości obniżeń na powierzchni terenu górniczego.
- 4) Możliwe jest zwiększenie dokładności metody zależności liniowych przez poprawę opisu prędkości narastania obniżeń nad postępującym frontem eksploatacyjnym.

Na podstawie badań dotyczących zasięgu deformacji górniczych można sformułować następujące wnioski:

- 1) Opracowano metodykę wyznaczania zasięgu oddziaływania deformacji na powierzchni z wykorzystaniem InSAR.
- 2) Zgodnie z opracowaną metodyką wyznaczono empiryczną zależność opisującą zasięg oddziaływania eksploatacji górniczej dla GZW równą:

$$L_{\text{sr}}(H) = 1,16H \pm 0,22H$$

- 3) Zależność potwierdza publikowane zależności opisu zasięgu oddziaływania eksploatacji określane na podstawie pomiarów obniżeń wykonywanych klasycznymi metodami geodezyjnymi.

Na podstawie badań dotyczących czasu zanikania deformacji górniczych na terenach pogórnicych sformułowano następujące wnioski:

- 1) Opracowano metodykę wyznaczania czasu zanikania deformacji na powierzchni po zakończeniu eksploatacji górniczej z wykorzystaniem InSAR. Metodyka pozwala na dokładniejsze określenie czasu zanikania deformacji względem klasycznych pomiarów geodezyjnych.
- 2) Zgodnie z opracowaną metodyką wyznaczono czas zaniku deformacji na poligonie badawczym jakim był teren górniczy, a następnie pogórnicy w śródmieściu Bytomia, który wyniósł 5 lat i 6 miesięcy, który jest analogiczny z faktycznym obniżaniem się powierzchni.
- 3) Analiza deformacji powierzchni w długim okresie wykazała występowania tak zwanych deformacji rezydualnych (resztkowych).

Na podstawie przedstawionych wniosków można stwierdzić, że cele niniejszej pracy, naukowej i użytkowej, zostały osiągnięte, a teza niniejszej pracy o następującym brzmieniu:

*Metody interferometrii satelitarnej pozwalają na wyznaczanie dużych obniżzeń powierzchni powstałych na skutek eksploatacji górniczej prowadzonej w warunkach GZW oraz na określanie granic zasięgu i czasu zaniku deformacji powierzchni na terenach górniczych i pogórnicych.*

została udowodniona.

Zaadaptowano metody InSAR do wykrywania dużych obniżzeń powierzchni, a także opracowano metody określania zasięgu i czasu zaniku deformacji z wykorzystaniem InSAR. Metody posłużyły do wyznaczenia zasięgu i czasu zaniku deformacji na terenach górniczych i pogórnicych, a otrzymane rezultaty zweryfikowane w oparciu o klasyczne pomiary geodezyjne. Wyniki niniejszej pracy mają charakter aplikacyjny gdyż mogą być wykorzystane w praktyce górniczej w zakresie ochrony powierzchni terenów górniczych i pogórnicych.



## Bibliografia

1. Abdelfattah R., Nicolas J. 2004. *Sub-pixelic Image Registration for SAR Interferometry Coherence Optimization*. In Proceedings of the XXth ISPRS Congress, Istanbul, Turkey.
2. Anderson K., Poland M. 2016. *Bayesian estimation of magma supply, storage, and eruption rates using a multiphysical volcano model: Kilauea Volcano, 2000–2012*. Earth and Planetary Science Letters, 447, 161–171.
3. Apanowicz B. 2022. *Use of InSAR in Linear Discontinuous Ground Deformation Generation Analysis: Case Study of a Mine in Poland*. Journal of Sustainable Mining, 21(1), 45-53.
4. Apanowicz B. 2022. *Linear discontinuous ground deformation detection based on coherence analysis of pre and post event radar image pairs*. Journal of Applied Geodesy, 16(2), 107-121.
5. Apanowicz B., Kowalski A., Gruchlik P., Polanin P. 2022. *Examples of the Knothe-Budryk theory parameter determination under complex geological and mining conditions*. Mining Science, 29, 19-32.
6. Atzori S., Antonioli A., Tolomei C., De Novellis V., De Luca C., Monterroso F. 2019. *InSAR full – resolution analysis of the 2017 – 2018  $M > 6$  earthquakes in Mexico*. Remote Sensing of Environment, 234, 111461.
7. Bals. R. 1932. *Beitrag zur Frage der Vorausberechnung bergbaulicher Senkungen*. Mitteilungen aus der Markscheidewessen, 42/43, 98-111.
8. Bamler. R., Hartl P. 1998. *Synthetic aperture radar interferometry*. Inverse Problems, 14(4), R1-R54.
9. Baran I., Stewart M., Claessens S. 2005. *A new functional model for determining minimum and maximum detectable deformation gradient resolved by satellite radar interferometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 43, 675-682.
10. Bechor N., Zebker H. 2006. *Measuring two-dimensional movements using a single InSAR pair*. Geophysical Research Letters, 33, L16311.
11. Beladam O., Balz T., Mohamadi B., Abdalhak M. 2019. *Using PS-InSAR with Sentinel-1 Images for Deformation Monitoring in Northeast Algeria*. Geosciences, 9, 315.
12. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E. 2002. *A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms*. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 40, 2375–2383.
13. Białek J. 1991. *Opis niestabilnej fazy obniżenia terenu górniczego z uwzględnieniem asymetrii wpływów końcowych*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
14. Białek J. 1993. *Sposób poprawy opisu wpływów dalekich*. Przegląd Górniczy, 3.

15. Białek J., Mielimąka R., Wesołowski M. 2001. *Zastosowanie metody elementów skończonych do opisu końcowych przemieszczeń poziomych i pionowych terenu górniczego*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo, 250, 81-90.
16. Białek J. 2003. *Algorytmy i programy komputerowe do prognozowania deformacji terenu górniczego*. Wydawnictwo Politechniki Śląskie, Gliwice.
17. Białek J., Sikora P. 2012. *Symulacje wpływu nachylenia pokładu i szczeliny uskokowej na rozkład obniżeń za pomocą metody automatów komórkowych*. Przegląd Górniczy, 68(8), 160-165.
18. Blachowski J., Milczarek W. 2016. *Deformacje wtórne terenów górniczych na obszarze dawnego Zagłębia Wałbrzyskiego. Monografia Miernictwo górnicze i ochrona terenów górniczych w obecnych warunkach wydobywania złóż surowców mineralnych w Polsce*. Wydawnictwo AGH, 113-123.
19. Blachowski J., Kopeć A., Milczarek W., Owczarz K. 2019. *Evaluation of secondary deformations captured by satellite radar interferometry: Case study of an abandoned coal basin in sw Poland*. Sustainability, 11(3), 884.
20. Blanco-Sánchez P., Mallorquí J., Duque S., Monells D. 2008. *The coherent pixels technique (CPT): An advanced DInSAR technique for nonlinear deformation monitoring*. Pure and Applied Geophysics, 165(6), 1167–1193.
21. Budryk W. 1953. *Wyznaczenie wielkości poziomych odkształceń terenu*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, 1(1), 63-74.
22. Budryk W., Knothe S. 1956. *Zasady klasyfikacji terenów Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego ze względu na możliwość ich zabudowy*. Biuletyn nr 4, PAN, Komitet dla Spraw Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego, Warszawa.
23. Carnec C., Massonnet D., King C. 1996. *Two examples of the use of SAR interferometry on displacement fields of small spatial extent*. Geophysical Research Letters, 23(24), 3579-3582.
24. Chaabani C., Chini M., Abdelfattah R., Hostache R., Chokmani K. 2018. *Flood mapping in a Complex Environment Using Bistatic TanDEM – X/TerraSAR – X InSAR Coherence*. Remote Sensing, 10(2), 1873.
25. Chen C., Zebker H. 2000. *Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms*. Journal of the Optical Society of America A, 17, 401-414.
26. Chen C., Zebker H. 2001. *Two-dimensional phase unwrapping with use of statistical models for cost functions in nonlinear optimization*. Journal of the Optical Society of America A, 18, 338-351.
27. Chen C., Zebker H. 2002. *Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 40(8), 1709-1719.

28. Chen Y., Tong Y., Tan K. 2020. *Coal Mining Deformation Monitoring Using SBAS-InSAR and Offset Tracking: A Case Study of Yu County, China*. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 13, 6077-6087.
29. Chen B., Mei H., Li Z., Wang Z., Yu Y., Yu H. 2021. *Retrieving three-dimensional large surface displacement in coal mining areas by combining SAR Pixel Offset measurements with an improved mining subsidence model*. Remote Sensing, 13, 2541.
30. Chrzanowski A., Szostak-Chrzanowska A., Forrester D. 1998. *100 years of ground subsidence studies*. Proceedings of the 100th CIM annual general meeting, Montreal.
31. Chudek M., Olszowski W. 1976. *Określanie rodzaju i wielkości deformacji nieciągłych powierzchni*. Ochrona Terenów Górniczych, 38.
32. Chudek M., Arkuszewski J., Olszowski W. 1980. *Deformacje nieciągłe w obszarach górniczych*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo, 10.
33. Chudek M., Arkuszewski J. 1980. *Wpływ warunków naturalno-górnicznych oraz czasu na proces tworzenia się deformacji zapadliskowych*. Ochrona Terenów Górniczych, 53.
34. Cieślak K., Milczarek W. 2022. *Application of Machine Learning in Forecasting the Impact of Mining Deformation: A Case Study of Underground Copper Mines in Poland*. Remote Sensing, 14(19), 4755.
35. Colesanti C., Ferretti A., Novali F., Prati C., Rocca F. 2003. *SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers technique*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 4, 1685–1701.
36. Costantini M. 1998. *A novel phase unwrapping method based on network programming*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 36, 813-821.
37. Costantini M., Falco S., Malvarosa F., Minati F. 2008. *A New Method for Identification and Analysis of Persistent Scatterers in Series of SAR Images*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2, 449–452.
38. Crippa C., Valbuzzi E., Frattini P., Crosta G., Spreafico M., Agliardi F. 2021. *Semi-automated regional classification of the style of activity of slow rock-slope deformations using PS InSAR and SqueeSAR velocity data*. Landslides, 18(7), 2445–2463.
39. Crosetto M., Biescas E., Duro J., Closa J., Arnaud A. 2008. *Generation of Advanced ERS and Envisat Interferometric SAR Products Using the Stable Point Network Technique*. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 74(4), 443–450.
40. Curlander J., McDonough R. 1991. *Synthetic Aperture Radar: System and Signal Processing*. Wiley Series in Remote Sensing and Image Processing. John Wiley & Sons, Nowy Jork.

41. Cwiękała M. 2022. Analiza przemieszczeń w strefie epicentralnej zjawisk sejsmicznych indukowanych eksploatacją górnictw. Rozprawa doktorska, Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
42. Delgado Blasco J.M., Fomelis M., Stewart C., Hooper A. 2019. *Measuring Urban Subsidence in the Rome Metropolitan Area (Italy) with Sentinel-1 SNAP-StaMPS Persistent Scatterer Interferometry*. Remote Sensing, 11(2), 129.
43. Desnos Y.L., Fomelis M., Engdahl M., Mathieu P.P., Palazzo F., Ramoino F., Zmuda A. 2016. *Scientific Exploitation of Sentinel-1 within ESA's SEOM programme element*. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 3878-3881.
44. Drzęzła B. 1978. *Rozwiązanie pewnego przestrzennego zadania liniowej teorii sprężystości w zastosowaniu do prognozowania deformacji górotworu pod wpływem eksploatacji górniczej wraz z oprogramowaniem*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo, 91.
45. Drzęzła B. 1989. *Opis programów prognozowania deformacji górotworu pod wpływem eksploatacji górniczej. Aktualny stan oprogramowania*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Seria Górnictwo, 165
46. Du S., Feng G., Wang J., Feng S., Malekian R., Li Z. 2019. *A new machine-learning prediction model for slope deformation of an open-pit mine: An evaluation of field data*. Energies, 12(7), 1288.
47. Dżegniuk B. 1975. *Niektóre efekty nieliniowe w procesie osiadania nad eksploatacją górnictw*. Zeszyty Naukowe AGH, Geodezja, 34.
48. Fan H., Gao X., Yang J., Deng K., Yu Y. 2015. *Monitoring Mining Subsidence Using A combination of Phase-Stacking and Offset-Tracking Methods*. Remote Sensing, 7, 9166-9183.
49. Fenk J. 1999. *Analityczne rozwiązanie opisujące wypiętrzenie powierzchni występujące przy likwidacji kopalń przez zatapianie*. Przegląd Górniczy, 11, 12-14.
50. Ferretti A., Prati C., Rocca F. 2000. *Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 38(5), 2202-2212.
51. Ferretti A., Prati C., Rocca F. 2001. *Permanent scatterers in SAR interferometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39(1), 8-20.
52. Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., Rocca F., Massonnet D. 2007. *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA Publications, Holandia.
53. Ferretti A., Novali F., Fumagalli A., Prati C., Rocca F., Rucci A. 2009. *The second generation psinsar approach: Squeesar*. In International Workshop ERS SAR Interferometry (FRINGE), Frascati, Italy.
54. Ferretti A. 2014. *Satellite InSAR Data: Reservoir Monitoring from Space*. EAGE, Houten, Holandia.

55. Filcek H., Walaszczyk J., Tajduś A. 1994. *Metody komputerowe w geomechanice górniczej*. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
56. Fomelis M., Delgado Blasco J.M., Desnos Y.L., Engdahl M., Fernandez D., Veci L., Lu J., Wong C. 2018. *SNAP – StaMPS Integrated processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry*. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).
57. Frużyński A. 2012. *Kopalnie węgla kamiennego w Polsce*. Dom Wydawniczy Księży Młyn, Łódź.
58. Fuhrmann, T., Garthwaite M. 2019. *Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-Geometry Data Fusion*. Remote Sensing, 11(3), 241.
59. Ghiglia D., Romero L. 1996. *Minimum Lp-norm two-dimensional phase unwrapping*. Journal of the Optical Society of America A, 13(10), 1999-2013.
60. Goldstein R., Zebker H., Werner C. 1988. *Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping*. Radio Science, 23, 713-720.
61. Golub G., Van Loan C. 1996. *Matrix Computation*. MD: Johns Hopkins University Press, Baltimore.
62. Graniczny M., Colombo D., Kowalski Z., Przyłucka M., Zdanowski A. 2015. *New results on ground deformation in the Upper Silesian Coal Basin (southern Poland) obtained during the DORIS Project (EU-FP 7)*. Pure and Applied Geophysics 172, 3029-3042.
63. Greń K. 1981. *Nowe ujęcie asymetrii wpływów eksploatacji górniczej przy poziomym zaleganiu złoża*. Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej PAN, Geodezja, 29.
64. Gruszczynska M. 1999. Historia i wykorzystanie zdjęć radarowych. Fotointerpretacja w geografii, Nr 29 Problemu Telegeoinformacji, PTG, 23-33.
65. Guarnieri A., Prati C. 1997. *SAR Interferometry: A “Quick and Dirty” Coherence Estimator for DATA Browsing*. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 35, 660-669.
66. Góral J. (red). 2005. *Badawcza sieć geodynamiczna na obszarze wschodniej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*. AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków.
67. Hanssen R. 2001. *Satellite Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. PhD Thesis, Remote Sensing and Digital Image Processing, Springer, Holandia.
68. Hay-Man Ng A., Ge L., Yan Y., Li X., Chang H-C., Zhang K., Rizos C. 2010. *Mapping accumulated mine subsidence using small stack of SAR differential interferograms in the Southern coalfield of New South Wales, Australia*. Engineering Geology, 115, 1 – 15.

69. Hejmanowski R., Kwinta A. 2009. *System prognozowania deformacji „MODEZ”*. X Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych, 113 – 124, Wydawnictwo AGH, Kraków.
70. Hejmanowski R. 2013. *Kinematyka deformacji górotworu i powierzchni*. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.
71. Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B. 2004. *A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers*. Geophysical Research Letters, 31, L2361
72. Hooper A., Zebker H. 2007. *Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series*. Journal of the Optical Society of America A, 24(9), 2737-2747.
73. Hooper A., Bekaert D., Spaans K., Arikan M. 2012. *Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation*. Tectonophysics, 514-517, 1-13.
74. Hooper A., Bekaert D., Hussain E., Spaans K. 2018. *StaMPS/MTI Manual*. School of Earth and Environment, Leeds, Wielka Brytania.
75. Huang J., Deng K., Fan H., Yan S. 2016. *An improved pixel-tracking method for monitoring mining subsidence*. Remote Sensing Letters, 7(8), 731-740.
76. Janusz W. 1970. *Zasięg wpływów eksploatacji górniczej*. Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej PAN, Geodezja, 8.
77. Jędrzejec E. 2002. *32-bitowa aplikacja Szkowy 4.0 do prognozowania poeksploatacyjnych deformacji górotworu*. Prace Naukowe GIG, 41, 193-200.
78. Jędrzejec E. 2008. *Eksperymentalna wersja 6.0 systemu Szkowy do prognozowania deformacji nieustalonych spowodowanych eksploatacją o zmiennych dobowych postęпах*. Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, wydanie specjalne, 115-118.
79. Jiang C., Wang L., Yu X. 2021. *Retrieving 3D Large Gradient Deformation Induced to Mining Subsidence Based on Fusion of Boltzmann Prediction Model and Single-Track InSAR Earth Observation Technology*. IEEE Access, 9, 87156-87172.
80. Jiang H., Pei Y., Li J. 2017. *Sentinel-1 TOPS interferometry for along-track displacement measurement*. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 57.
81. Kampes B. 2006. *Radar Interferometry: Persistent Scatterer Technique*. Remote Sensing and Digital Image Processing, Springer Netherlands.
82. Keinhorst H. 1934. *Betrachtungen zur Bergschädenfrage*. Glückauf, 149.
83. Klabis L., Kowalski A. 2015. *Eksploatacja górnicza w filarze ochronnym dla śródmieścia Bytomia, historia i teraźniejszość*. Przegląd Górniczy, 71(5), 33-43.
84. Knothe S. 1953a. *Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, 1(1), 22-38.

85. Knothe S. 1977. *Założenia, dorobek poznawczy i praktyczny w zakresie ochrony powierzchni i eksploatacji w filarach ochronnych na przykładzie eksploatacji pod miastem Bytomiem*. W: Mater. Sesji Nauk.-Tech. z okazji wydobywania 50 mln tony węgla z filara ochronnego pod miastem Bytom, s. 20.
86. Knothe S. 1984. *Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.
87. Knothe S. 1993. *Teoria Budryka-Knothe’go po latach*. Szkoła Eksploatacji Podziemnej, 2, 181-192.
88. Kochmański T. 1956. *Obliczenia ruchów punktów górotworu pod wpływem eksploatacji górniczej*. Państwowa Akademia Nauk, Warszawa.
89. Konopko W., (red). 2013. *Bezpieczeństwo pracy w kopalniach węgla kamiennego*. Tom 1. Wydawnictwo GIG, Katowice.
90. Kowalczyk Z. 1972. *Określenie wpływów eksploatacji górniczej metodą przekrojów pionowych*. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice.
91. Kowalski A., (red). 2000. *Eksploatacja górnicza a ochrona powierzchni. Doświadczenia z walbrzyskich kopalń*. Wydawnictwo GIG, Katowice.
92. Kowalski A. 2007. *Nieustalone górnicze deformacje powierzchni w aspekcie dokładności prognoz*. Prace Naukowe GIG, nr 871.
93. Kowalski A., Jędrzejec E., Gruchlik P. 2010. *Linear discontinuous deformations of the surface in the Upper Silesian Coal Basin*. Archives of Mining Sciences, 55(2), 331-346.
94. Kowalski A. 2015. *Deformacje powierzchni w górnośląskim zagłębiu węglowym*. Wydawnictwo GIG, Katowice.
95. Kowalski A. 2017. *Problem oceny zanikania resztkowych deformacji powierzchni po zakończonej eksploatacji górniczej*. Przegląd Górniczy, 11, 55-65.
96. Kowalski A., Walentek A., Polanin P. 2019. *Numerical simulation of subsidence caused by roadway system*. Archives of Mining Sciences, 64(2), 385-397.
97. Kowalski A. 2020. *Deformacje powierzchni na terenach górniczych kopalń węgla kamiennego*. Wydawnictwo GIG, Katowice.
98. Kura K. 2020. *Analiza interferometryczna zmian powierzchni terenu wywołanych silnym wstrząsem*. Przegląd Górniczy, 5, 19-27.
99. Kwaśniewski M., Wang J. 1994. *Symulacja komputerowa eksploatacji pokładu węgla systemem ścianowym z zawalem stropu*. Wyniki prac z realizacji projektu celowego nr 231/CS6-9/92, Politechnika Śląska, Gliwice.
100. Kwiatek J., (red). 1997. *Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych*. Wydawnictwo GIG, Katowice.

101. Kwiatek J. (red). 2000. *Zasady oceny możliwości prowadzenia podziemnej eksploatacji górniczej z uwagi na ochronę obiektów budowlanych*. Wydawnictwo GIG, Seria Instrukcje, 12, Katowice.
102. Lanari R., Mora O., Manunta M., Mallorquí J.J., Berardino P., Sansosti E. 2004. *A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms*. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 42, 1377–1386.
103. Lazecky M., Spaans K., Gonz'alez P., Maghsoudi Y., Morishita Y., Albino F., Elliott J., Greenall N., Hatton E., Hooper A., Juncu D., McDougall A., Walters R., Watson C., Weiss J., Wright T. 2020. *LiCSAR: An automatic InSAR tool for measuring and monitoring tectonic and volcanic activity*. Remote sensing, 12(15), 2430.
104. Lei Y., Gardner A., Agram P. 2021. *Autonomous Repeat Image Feature Tracking (autoRIFT) and Its Application for Tracking Ice Displacement*. Remote Sensing, 13, 749.
105. Liao M., Lin H., Zhang Z. 2004. *Automatic registration of InSAR data based on Least-square matching and multi-step strategy*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 70(10), 1139-1144.
106. Lin Q. 1992. *New Approaches in Interferometric SAR Data Processing*. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 30, 560-567.
107. Litwiniszyn J. 1953. *Równanie różniczkowe przemieszczeń górotworu*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, 1(1), 9-21.
108. Litwiniszyn J. 1956. *Zastosowanie równań procesów stochastycznych do mechaniki górotworu*. Archiwum Górnictwa, 1(3), 243-269.
109. Liu Z., Bian Z., Liu W. 2022. *Monitoring of large and inconsistent deformation in coal mining area using point-like target offset tracking*. International Journal of Remote Sensing, 43(4), 1157-1177.
110. Makowski A. 1924. *Polskie Zagłębie Węglowe (budowa, zasoby, produkcja)*. Sprawozdania PIG, 2(3-4).
111. Malinowska A., Witkowski W., Hejmanowski R., Chang L., Van Leijen F., Hanssen R. 2019. *Sinkhole occurrence monitoring over shallow abandoned coal mines with satellite – based persistent scatterer interferometry*. Engineering Geology, 262, 1-13.
112. Marcak H., Zuberek W. 1994. *Geofizyka górnicza*. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
113. Massonnet D., Fiegl K. 1998. *Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface*. Reviews of Geophysics, 36(4), 441-500.
114. Mastro P., Serio C., Masiello G., Pepe A. 2020. *The Multiple Aperture SAR Interferometry (MAI) Technique for the Detection of Large Ground Displacement Dynamics: An Overview*. Remote Sensing, 12, 1189.



115. Melchior P. 1983. *The Tides of the Planet Earth*. Elsevier Science and Technology, USA, Oakland.
116. Milczarek W. 2011. Analiza zmian powierzchni górotworu po zakończeniu eksploatacji górniczej w wybranym rejonie dawnego Wałbrzyskiego Zagłębia. Rozprawa doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław.
117. Milczarek W., Blachowski J., Grzempowski P. 2017. *Application of PSInSAR for assessment surface deformation in post-mining area -case study of the former Walbrzych hard coal basin (SW Poland)*. Acta Geodynamica et Geomaterialia, 14(1), 41-52.
118. Milczarek W., Kopeć A., Głowacki T. 2022. *Mapping Ice Flow Velocity of Tidewater Glaciers in Hornsund Fiord Area with the Use of Autonomous Repeat Image Feature Tracking (2018-2022)*. Remote Sensing, 14(21), 5429.
119. Mohamadi T., Balz T., Younes A. 2020. *Towards a PS-InSAR Based Prediction Model for Building Collapse: Spatiotemporal Patterns of Vertical Surface Motion in Collapsed Building Areas—Case Study of Alexandria, Egypt*. Remote Sensing, 12(20), 3307.
120. Ng A., Ge L., Yan Y., Li X., Chang H-C., Zhang K., Rizos C. 2010. *Mapping accumulated mine subsidence using small stack of SAR differntia interferograms in the Southern coalfield of New South Wales, Australia*. Engineering Geology, 115, 1-15.
121. Ng. H., Ge L., Du Z., Wang S., Ma C. 2017. *Satellite radar interferometry for monitoring subsidence induced by longwall mining activity using Radarsat-2, Sentinel-1 and ALOS-2 data*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 61, 92–103.
122. Niemiec R., Niemiec T. 2008. *Błądzenie losowe i jego zastosowanie do modelowania deformacji górotworu powodowanych eksploatacją górniczą*. Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, VI, 351-364.
123. Niemiec T. 2020. *Model dyskretny i stochastyczny oddziaływania eksploatacji górniczej*. Wydawnictwo GIG, Katowice.
124. Ostrowski J. 2015. *Deformacje powierzchni terenu górniczego*. Agencja Wydawniczo-Poligraficzna Art.-Tekst, Kraków.
125. Ou D., Tan K., Du Q., Chen Y., Ding J. 2018. *Decision Fusion of D-InSAR and Pixel Offset Tracking for Coal Mining Deformation Monitoring*. Remote Sensing, 10, 1055.
126. Pawluszek-Filipiak K., Borkowski A. 2020. *Integration of DInSAR and SBAS Techniques to Determine Mining-Related Deformations Using Sentinel-1 Data: The Case Study of Rydułtowy Mine in Poland*. Remote Sensing, 12, 242.
127. Perissin D., Wang T. 2012. *Repeat-Pass SAR Interferometry With Partially Coherent Targets*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(1), 271–280.

128. Perski Z., Mróz M. 2007. *Zastosowanie metod interferometrii radarowej InSAR do badania naturalnych ruchów powierzchni terenu w Polsce. Projekt GEO-IN-SAR.* Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 17b, 613-624.
129. Popiołek E. 2009. *Ochrona terenów górniczych.* Wydawnictwo AGH, Kraków.
130. Pratti C., Rocca F., Monti-Guarnieri A., Pasquali P. 1994. *Report on ERS – 1 SAR interferometric techniques and applications.* Frascati, Włochy.
131. Preiss M., Stacy N. 2006. *Coherent Change Detection: Theoretical Description and Experimental Results.* Defence Science and Technology Organisation, Australia.
132. Przyłucka M., Herrera G., Graniczny M., Colombo D., Bejar-Pizarro M. 2015. *Combination of Conventional and Advanced DInSAR to Monitor Very Fast Mining Subsidence with TerraSAR-X Data: Bytom City (Poland).* Remote Sensing, 7, 5300-5328.
133. Przyłucka M., Graniczny M. 2015. *Kompleksowe wykorzystanie przetworzeń DInSAR i PSInSAR w badaniu pionowych przemieszczeń terenu w wybranych rejonach GO.* Przegląd Górniczy, 3, 80-88.
134. Przyłucka M. 2016. *Geostatystyczna analiza uwarunkowań osiadań terenu zidentyfikowanych przy pomocy interferometrii satelitarnej na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego.* Rozprawa doktorska, Państwowy Instytut Geologiczny – PIB, Warszawa.
135. Ryncarz T. 1992. *Ruchy górotworu wywołane wyrobiskami podziemnymi.* Wydawnictwo AGH, Kraków.
136. Samsonov S., D'Oreye N., Smets B. 2013. *Ground deformation associated with post-mining activity at the French-German border revealed by novel InSAR time series method.* International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 23(1),142-154.
137. Sandwell D., Mellors R., Tong X., Wei M., Wessel P. 2011. *Open radar interferometry software for mapping surface deformation.* EOS, Transactions American Geophysical Union, 92(28), 233-240.
138. Schmidt, D., Bürgmann R. 2003. *Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set.* Journal of Geophysical Research, 108(B9), 2416.
139. Shi M., Yang H., Wang B., Peng J., Gao Z., Zhang B. 2021. *Improving Boundary Constraint of Probability Integral Method in SBAS-InSAR for Deformation Monitoring in Mining Areas.* Remote Sensing, 13, 1497.
140. Sikora P. 2019. *Zastosowanie metody automatów komórkowych do opisu deformacji górotworu spowodowanych podziemną eksploatacją górniczą.* Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
141. Skolnik M. (red). 1990. *Radar Handbook.* McGraw-Hill, Nowy Jork, wydanie 2.

142. Sopata P., Stoch T., Wójcik A., Mrocheń D. 2020. *Land surface subsidence due to mining-induced tremors in the Upper Silesian Coal Basin (Poland) – Case Study*. Remote Sensing, 12(33), 3923.
143. Strang G. 1988. *Linear Algebra and Its Applications*. FL; Harcourt Brace Jovanovich, Orlando.
144. Strozzi T., Caduff R., Jones N., Barboux C., Delaloye R., Bodin X., K¨a¨ab A., M¨atzler E., Schrott L. 2020. *Monitoring rock glacier kinematics with satellite synthetic aperture radar*. Remote Sensing, 12(3), 559.
145. Suresh D., Yarrakula K. 2019. *InSAR based deformation mapping of earthquake using Sentinel 1A imagery*. Geocarto International, 35(5), 559-568.
146. Szostak-Chrzanowska A. 1988. *Wpływ podziemnej eksploatacji złóż o skomplikowanej geometrii na powierzchnię terenu w świetle badań metodą elementów skończonych*. Rozprawa Doktorska, AGH, Kraków.
147. Szostak-Chrzanowska A., Pielok J., Piwowarski W., Pietruszka K. 1997. *Wstępna analiza pola górniczych deformacji górotworu w dyskretnym modelu metody elementów skończonych i ciągłym modelu teorii geometrycznej*. IV Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych, 207-222, Wydawnictwo AGH, Kraków.
148. Szostak-Chrzanowska A., Chrzanowski A., Hiroji A. 2011. *Modelowanie osiadania terenu w oparciu o zmianę rozkładu naprężeń w górotworze*. XI Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych, Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, 2/1, 524-536.
149. Sokoła-Szewioła V. 2011. *Badanie i modelowanie czasowych zmian przemieszczeń pionowych terenu górniczego w okresie wystąpienia wstrząsu indukowanego eksploatacją górnictw*. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
150. Ścigała R. 2008. *Komputerowe wspomaganie prognozowania deformacji górotworu i powierzchni*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice.
151. Tajduś A. 1983. *Zastosowanie elementów skończonych do zagadnień reologicznych mechaniki górotworu*. Górnictwo, 4, 307-322.
152. Tajduś K. 2007. *Numeryczne określanie metodą elementów skończonych wpływu eksploatacji podziemnej na powierzchnię terenu*. Przegląd Górniczy, 63(5), 36-42.
153. Tajduś K. 2013. *Numerical simulation of underground mining exploitation influence upon terrain surface*. Archives of Mining Sciences, 58(3), 605-616.
154. Tribolet J. 1977. *A new phase unwrapping algorithm*. IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 25(2), 170-177.
155. Tung S., Masterlark T. 2016. *Coseismic slip distribution of the 2015 Mw 7.8 Gorkha, Nepal, earthquake from joint inversion of GPS and InSAR data for slip within a 3-D heterogeneous Domain*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121(5), 3479-3503.

156. Tyrała A. 1995. *Zmiany końcowych stanów deformacji powierzchni pod wpływem czasu*. Prace Naukowe GIG, Seria Konferencje, 3.
157. Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. *Prawo geologiczne i górnicze*. (Dz. U. 2011 Nr 163 poz. 981).
158. Wagner D. 2019. *Zanikanie obniżenia powierzchni śródmieścia Bytomia w latach 2015 – 2018 po zakończonej eksploatacji przez KWK Centrum*. Przegląd Górniczy, 75(1), 33–39.
159. Walaszczyk J. 1980. *O pewnych możliwościach zastosowania metod numerycznych do zagadnienia odprężeni górotworu*. Zeszyty Naukowe AGH, Górnictwo, 107.
160. Walaszczyk J., Wiewiórka D. 2004. *Wpływ naruszenia ciągłości warstw skalnych na generowanie w nich zjawisk dynamicznych*. Biuletyn WAT, 6, 23-34.
161. Walaszczyk J., Wiewiórka D. 2007. *Analiza drgań powierzchni terenu wywołanych pękaniem warstw skalnych*. Górnictwo i Geoinżynieria, 3, 427-435.
162. Washaya P., Balz T., Mohamadi B. 2018. *Coherence Change – Detection with Sentinel-1 for Natural and Anthropogenic Disaster Monitoring in Urban Areas*. Remote Sensing, 10(7), 1026.
163. Wempen J., McCarter M. 2017. *Comparison of L-band and X-band differential interferometric synthetic aperture radar for mine subsidence monitoring in central Utah*. International Journal of Mining Science and Technology, 27, 159-163.
164. Werner C., Wegmuller U., Strozzi T., Wiesmann A. 2003. *Interferometric point target analysis for deformation mapping*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 7, 4362-4364.
165. Wesółowski M. 2001. *Wybrane aspekty modelowania numerycznego ruchów górotworu pod wpływem eksploatacji podziemnej i jej oddziaływania na obiekty*. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice.
166. Wesółowski M. 2016. *Numerical modeling of exploitation relics and faults influence on rock mass deformations*. Archives of Mining Sciences, 61(1), 125-136.
167. Wessel P., Luis J., Uieda L., Scharroo R., Wobbe F., Smith W., Tian D. 2019. *The Generic Mapping Tools version 6*. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20, 5556-5564.
168. Weydahl D. 1991. *Change detection in SAR images*. IEEE IGRSS, Espoo, Finland.
169. Witkowski W., Mrocheń D., Sopata P., Stoch T. 2021. *Integration of the leveling observations and PSInSAR results for monitoring deformations caused by underground mining*. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 6614-6617.
170. Vervoort A., Declercq P.Y. 2017. *Surface movement above old coal longwalls after mine closure*. International Journal of Mining Science and Technology, 27, 481-490.

171. Villasenor J., Zebker H. 1992. *Temporal decorrelation in repeat – pass radar interferometry*. Proceedings of IGARSS'92, Houston.
172. Yang C., Zhang Q., Zhao C., Ji L., Zhu W. 2010. *Monitoring mine collapse by D-InSAR*. Mining Science and Technology, 20(5), 696-700.
173. Yang Z., Li Z., Zhu J., Yi H., Hu J., Feng G. 2017. *Deriving Dynamic Subsidence of Coal Mining Areas Using InSAR and Logistic Model*. Remote Sensing, 9, 125.
174. Zakład Geologii, Geofizyki i Ochrony Powierzchni GIG. 2022. *Szczegółowa prognoza deformacji powierzchni dla drogi S1 obwodnicy Bierunia*. Archiwum Zakładowe GIG (praca niepublikowana).
175. Zakład Ochrony Powierzchni i Obiektów Budowlanych GIG 2020. *Dokumentacja określająca kategoryzację przydatności terenu do zabudowy po zakończeniu działalności górniczej dla SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”*. Archiwum Zakładowe GIG (praca niepublikowana).
176. Zebker H., Goldstein R. 1986. *Topographic mapping from interferometric SAR observations*. Journal of Geophysical Research, 91, 4993-4999.
177. Zebker H., Werner C., Rosen P., Hensley S. 1994. *Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar*. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 32, 823-836.
178. Zebker H., Lu Y. 1998. *Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least-squares, and synthesis algorithms*. Journal of the Optical Society of America A, 15, 586-598.
179. Zhang L., Ding X., Lu Z. 2011. *Ground settlement monitoring based on temporarily coherent points between two SAR acquisitions*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66, 146-152.
180. Zhao G., Wang L., Deng K., Wang M., Xu Y., Zheng M., Luo Q. 2021. *And Adaptive Offset-Tracking Method Based on Deformation Gradients and Image Noises for Mining Deformation Monitoring*. Remote Sensing, 13, 2958.
181. Zienkiewicz O. 1972. *Metoda elementów skończonych*. Wydawnictwo Arkady, Warszawa.
182. Zou W., Li Z., Ding X. 2006. *Effects of the intervals of tiepoints used in co-registration on the accuracy of digital elevation models (DEM) generated by InSAR*. Photogrammetric Record, 21(115), 232-254.
183. Zou W., Li Z., Ding, X. 2007. *Determination of optimum window size for SAR image co-registration with decomposition of auto-correlation*. Photogrammetric Record, 22(119), 237-255.
184. Zych J. 1987. *Metoda pognozowania wpływów eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu uwzględniająca asymetryczny przebieg procesu deformacji*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Górnictwo, 164.

## Strony internetowe

1. European Space Agency. *User Guides – Sentinel Online*.  
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides>, dostęp online: 23.02.2023 r.
2. Committee on Earth Observation Satellites. *CEOS EO Handbook – Mission Index*.  
<http://database.eohandbook.com/database/missionindex.aspx#T>, dostęp online: 23.02.2023 r.
3. TRE Altamira. A CLS Group Comapny  
<https://site.tre-altamira.com/insar/>, dostęp online: 23.02.2023 r.
4. Górnośląsko-Zagłębiowska Metropolia  
<https://metropoliagzm.pl/>, dostęp online: 15.02.2023 r.

## Spis załączników

**Załącznik nr 1** – Mapa rejonów badawczych i pionowych przemieszczeń powierzchni powstałych na skutek eksploatacji w GZW, w okresie 03.2015 – 02.2022, wyznaczonych z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS – układ PL2000/6, EPSG:2177, skala 1:100 000.

## Spis rysunków

- Rys. 3.1.** Rozkład wskaźników deformacji powierzchni spowodowanej eksploatacją nieskończonego pasa pokładu; w – obniżenia, T – nachylenia, K – krzywizny pionowe, u – przemieszczenia poziome,  $\varepsilon$  – odkształcenia poziome (opracowanie własne na podstawie Knothe 1984)..... 25
- Rys. 3.2.** Rozkład deformacji powierzchni w długim okresie czasu (opracowanie własne na podstawie Kowalski i in. 2000)..... 30
- Rys. 3.3.** Najczęściej stosowane tryby pozyskiwania obrazów SAR (ESA User Guides 2023)..... 33
- Rys. 3.4.** Diagram przedstawiające żywotność poszczególnych konstelacji satelitów radarowych wraz z planowanymi misjami w przyszłości (opracowanie własne na podstawie CEOS EO Handbook 2023). ..... 35
- Rys. 3.5.** Schemat geometrii pomiaru SAR (opracowanie własne na podstawie Ferretti i in. 2007)..... 36
- Rys. 3.6.** Schemat działania metod różnicowych (DInSAR, OTM, MAI) i metod szeregów czasowych (PSInSAR, SBAS) (opracowanie własne na podstawie <https://site.tre-altamira.com/insar/>, dostęp 23.02.2023)..... 41
- Rys. 4.1.** Granica Górnośląskiego Zagłębia Węglowego po polskiej stronie (linia czerwona), wraz z lokalizacją obszarów górniczych czynnych kopalń węgla kamiennego (kolor fioletowy) i zlikwidowanych (kolor niebieski), stan na luty 2023 – układ PL-2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne na podstawie Kowalski 2020). ..... 43

<b>Rys. 4.2.</b> Lokalizacja niecek geologicznych i głównych uskoków tektonicznych w GZW (Konopko i in. 2013). .....	45
<b>Rys. 4.3.</b> Lokalizacja ściany nr 373a w pokładzie 209 wraz z przebiegiem linii pomiarowych zlokalizowanych wzdłuż ulicy Warszawskiej (punkty zielone) oraz Węglowej (punkty niebieskie) w Bieruniu – układ PL2000/6, EPSG: 2177 (opracowanie własne).....	47
<b>Rys. 4.4.</b> Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu w okresie 11.11.2020 – 12.11.2021 spowodowane eksploatacją ściany 373a w pokładzie 209 (opracowanie własne).....	48
<b>Rys. 4.5.</b> Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. Węglowej w Bieruniu w okresie 13.11.2020 – 16.11.2021 spowodowane eksploatacją ściany 373a w pokładzie 209 (opracowanie własne).....	48
<b>Rys. 4.6.</b> Lokalizacja ścian nr 5 i 6 w pokładzie 503 oraz ściany 7 w pokładzie 504 wraz z przebiegiem linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ulicy Karbowskiej w Bytomiu, w dzielnicy Miechowice (punkty niebieskie) oraz z lokalizacją strefy dna niecki bytomskiej – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne). .....	49
<b>Rys. 4.7.</b> Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. Karbowskiej w Bytomiu, w dzielnicy Miechowice w okresie 18.04.2016 – 17.10.2018 spowodowane eksploatacją ścian 5 i 6 w pokładzie 503 (opracowanie własne). .....	50
<b>Rys. 4.8.</b> Lokalizacja parcel eksploatacyjnych Z.G. EKO-PLUS Sp. z o.o. oraz linii pomiarowych wzdłuż ul. Celnej i autostrady A1 w Bytomiu – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).....	51
<b>Rys. 4.9.</b> Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. Celnej w Bytomiu w okresie 15.11.2016 – 15.08.2019 spowodowane eksploatacją górniczą prowadzoną przez ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne).....	51
<b>Rys. 4.10.</b> Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż autostrady A1 (strona południowa) w Bytomiu w okresie 15.11.2016 – 15.08.2019 spowodowane eksploatacją górniczą prowadzoną przez ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne).....	52
<b>Rys. 4.11.</b> Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż autostrady A1 (strona północna) w Bytomiu w okresie 15.11.2016 – 15.08.2019 spowodowane eksploatacją górniczą prowadzoną przez ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne).....	52
<b>Rys. 4.12.</b> Lokalizacja ścian eksploatacyjnych w poszczególnych pokładach względem linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).....	53
<b>Rys. 4.13.</b> Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach (część 1) w okresie 22.07.2015 – 05.07.2018 spowodowane eksploatacją górniczą (opracowanie własne). .....	54
<b>Rys. 4.14.</b> Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach (część 2) w okresie 22.07.2015 – 10.09.2021 spowodowane eksploatacją górniczą (opracowanie własne). .....	54

<b>Rys. 4.15.</b> Lokalizacja ścian eksploatacyjnych w pokładach 413/2 i 414/2 wraz z przebiegiem linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ulicy 1-go Maja w Rudzie Śląskiej w dzielnicy Wirek (punkty fioletowe) – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne). .....	55
<b>Rys. 4.16.</b> Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. 1-go Maja w Rudzie Śląskiej w dzielnicy Wirek, w okresie 12.01.2018 – 09.03.2021 spowodowane eksploatacją górnictw pokładu 414/2 (opracowanie własne).....	56
<b>Rys. 4.17.</b> Lokalizacja ścian eksploatacyjnych nr 1 i 4 w pokładzie 414/1 w Rudzie Śląskiej w dzielnicy Halemba – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne). .....	57
<b>Rys. 4.18.</b> Lokalizacja ściany F-3 pokładu 406/1 wraz z przebiegiem linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ulicy Pszczyńskiej (DW933) w Jastrzębiu Zdroju – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).....	58
<b>Rys. 4.19.</b> Obniżenia powierzchni zmierzone wzdłuż ul. Pszczyńskiej w Jastrzębiu Zdroju, w okresie 16.04.2018 – 05.11.2020 spowodowane eksploatacją górnictw pokładu ściany F-3 w pokładzie 406/1 (opracowanie własne). .....	58
<b>Rys. 4.20.</b> Granica filara ochronnego śródmieścia Bytomia (linia przerywana) wraz z granicami obszarów górnictw kopalń - układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne na podstawie Kowalski 2015). .....	59
<b>Rys. 4.21.</b> Ostatnia tona węgla wydobyta z rejonu filara ochronnego śródmieścia Bytomia przez KWK Centrum (źródło własne). .....	60
<b>Rys. 4.22.</b> Lokalizacja ostatniej eksploatacji w pokładzie 510 wd. (niebieskie kontury) prowadzonej przez KWK Centrum w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia (linia czerwona przerywana) – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne na podstawie Kowalski 2020). .....	61
<b>Rys. 4.23.</b> Schemat osnowy pomiarowej w śródmieściu Bytomia nawiązanej do repera w Suchej Górze (opracowanie własne na podstawie Wagner 2019).....	63
<b>Rys. 4.24.</b> Izolinie przedstawiające obniżenia [m] powstałe na skutek eksploatacji górnictw w latach 1949 – 04.2015 w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia – układ PL2000/6, EPSG: 2177 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”). .....	63
<b>Rys. 4.25.</b> Obniżenia powierzchni zmierzone po zakończeniu eksploatacji w filarze ochronnym śródmieścia Bytomia (opracowane na podstawie Kowalski 2020).....	64
<b>Rys. 5.1.</b> Przykład połączeń par zobrazowań SAR w metodzie SBAS z uwagi na długość linii bazowej i czasowej; każdy punkt definiuje jedno zobrazowanie SAR, a linie symbolizują interferogramy (opracowanie własne).....	66
<b>Rys. 5.2.</b> Schemat rozkładu linii bazowej i czasowej dla ścieżki a) wznoszącej nr 175; b) opadającej nr 124 (opracowanie własne).....	67
<b>Rys. 5.3.</b> Lokalizacja GZW (czarna linia ciągła) względem wykorzystanych zobrazowań SAR ze ścieżki wznoszącej nr 175 (kolor niebieski) oraz opadającej nr 124 (kolor czerwony) oraz przebieg granic państwowych (czarna linia przerywana) – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne).....	68



- Rys. 5.4.** Pionowe obniżenia powierzchni spowodowane eksploatacją górnictwem w GZW w okresie 03.2015 – 02.2022 wyznaczone z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS wraz z lokalizacją linii pomiarowych wykorzystanych do walidacji wyników – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne). ..... 71
- Rys. 5.5.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu w terenie górnictwem KWK Piast-Ziemowit Ruch Piast (opracowanie własne). ..... 72
- Rys. 5.6.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 82 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu w terenie górnictwem KWK Piast-Ziemowit Ruch Piast (opracowanie własne). ..... 72
- Rys. 5.7.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Węglowej w Bieruniu w terenie górnictwem KWK Piast-Ziemowit Ruch Piast (opracowanie własne). ..... 73
- Rys. 5.8.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 32 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Węglowej w Bieruniu w terenie górnictwem KWK Piast-Ziemowit Ruch Piast (opracowanie własne). ..... 73
- Rys. 5.9.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Celnej w Bytomiu w terenie górnictwem ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne). ..... 74
- Rys. 5.10.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 11 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Celnej w Bytomiu w terenie górnictwem ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne). ..... 74
- Rys. 5.11.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż autostrady A1 w Bytomiu (strona południowa) w terenie górnictwem ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne). 75
- Rys. 5.12.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 25 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż autostrady A1 w Bytomiu (strona południowa) w terenie górnictwem ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne). ..... 75
- Rys. 5.13.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS

(linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż autostrady A1 w Bytomiu (strona północna) w terenie górniczym ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne). .... 76

**Rys. 5.14.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetworzenia obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 48 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż autostrady A1 w Bytomiu (strona północna) w terenie górniczym ZG EKO-PLUS Sp. z o.o. (opracowanie własne). ..... 76

**Rys. 5.15.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetworzenia obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Karbowskiej w Bytomiu w terenie górniczym KWK Bobrek-Piekary Ruch Bobrek (opracowanie własne). ..... 77

**Rys. 5.16.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetworzenia obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 967 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Karbowskiej w Bytomiu w terenie górniczym KWK Bobrek-Piekary Ruch Bobrek (opracowanie własne). ..... 77

**Rys. 5.17.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetworzenia obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach w terenie górniczym KWK ROW Ruch Marcel (opracowanie własne). .... 78

**Rys. 5.18.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetworzenia obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr W-93 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach w terenie górniczym KWK ROW Ruch Marcel (opracowanie własne). ..... 78

**Rys. 5.19.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetworzenia obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. 1-go Maja w Rudzie Śląskiej w terenie górniczym KWK Ruda Ruch Pokój (obecnie SRK Oddział KWK Pokój I – Pokój II) (opracowanie własne). ..... 79

**Rys. 5.20.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetworzenia obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 1270 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. 1-go Maja w Rudzie Śląskiej w terenie górniczym KWK Ruda Ruch Pokój (obecnie SRK Oddział KWK Pokój I – Pokój II) (opracowanie własne). ..... 79

**Rys. 5.21.** Porównanie wartości obniżeń zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami wyznaczonymi z przetworzenia obrazów SAR metodą SBAS (linia przerywana) na linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Pszczyńskiej w Jastrzębiu Zdroju w terenie górniczym KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka (opracowanie własne). ..... 80

**Rys. 5.22.** Porównanie obniżeń w funkcji czasu zmierzonych klasycznymi metodami geodezyjnymi (linia ciągła) z obniżeniami w funkcji czasu wyznaczonymi z przetworzenia

zobrazowań SAR metodą SBAS (linia przerywana) na reperze nr 63 będącym częścią linii pomiarowej zlokalizowanej wzdłuż ul. Pszczyńskiej w Jastrzębiu Zdroju w terenie górniczym KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka (opracowanie własne). .....	80
<b>Rys. 5.23.</b> Przykład połączeń par zobrazowań w metodzie PSInSAR; każdy punkt definiuje jedno zobrazowanie SAR, a linie symbolizują interferogramy (opracowanie własne). .....	83
<b>Rys. 5.24.</b> Schemat postępowania podczas procesu przetwarzania zobrazowań SAR metodą PSInSAR (opracowanie własne). .....	86
<b>Rys. 5.25.</b> Punkty PS reprezentujące przemieszczenie powierzchni w kierunku LOS w okresie 24.04.2015 – 30.04.2016, wyznaczone z przetwarzania zobrazowań SAR metodą PSInSAR – układ WGS84, EPSG:4326 (opracowanie własne). .....	87
<b>Rys. 5.26.</b> Punkty PS reprezentujące przemieszczenie powierzchni w kierunku LOS w okresie 30.04.2016 – 01.05.2017, wyznaczone z przetwarzania zobrazowań SAR metodą PSInSAR – układ WGS84, EPSG:4326 (opracowanie własne). .....	88
<b>Rys. 5.27.</b> Punkty PS reprezentujące przemieszczenie powierzchni w kierunku LOS w okresie 01.05.2017 – 02.05.2018, wyznaczone z przetwarzania zobrazowań SAR metodą PSInSAR – układ WGS84, EPSG:4326 (opracowanie własne). .....	88
<b>Rys. 5.28.</b> Punkty PS reprezentujące przemieszczenie powierzchni w kierunku LOS w okresie 02.05.2018 – 05.11.2019, wyznaczone z przetwarzania zobrazowań SAR metodą PSInSAR – układ WGS84, EPSG:4326 (opracowanie własne). .....	89
<b>Rys. 5.29.</b> Punkty PS reprezentujące przemieszczenie powierzchni w kierunku LOS w okresie 05.11.2019 – 21.02.2021, wyznaczone z przetwarzania zobrazowań SAR metodą PSInSAR – układ WGS84, EPSG:4326 (opracowanie własne). .....	89
<b>Rys. 5.30.</b> Punkty PS reprezentujące przemieszczenie powierzchni w kierunku LOS w okresie 21.02.2021 – 30.03.2022, wyznaczone z przetwarzania zobrazowań SAR metodą PSInSAR – układ WGS84, EPSG:4326 (opracowanie własne). .....	90
<b>Rys. 5.31.</b> Lokalizacja reperów pomiarowych wykorzystanych do walidacji wyników uzyskanych z przetwarzania zobrazowań SAR metodą PSInSAR wraz z ostatnią prowadzoną eksploatacją w pokładzie 510 w.d. (linie niebieskie) w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia (linia czerwona przerywana) – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne). .....	91
<b>Rys. 5.32.</b> Wykres przedstawiający przemieszczenia powierzchni w kierunku LOS w funkcji czasu uzyskane z przetwarzania zobrazowań SAR metodą PSInSAR wraz z dopasowaną linią trendu oraz obniżenia pionowe w funkcji czasu, pomierzone z wykorzystaniem klasycznych pomiarów geodezyjnych, na reperze nr 2232, zlokalizowanym w północnej części filara ochronnego Śródmieścia Bytomia (opracowanie własne). .....	92
<b>Rys. 5.33.</b> Wykres przedstawiający przemieszczenia powierzchni w kierunku LOS w funkcji czasu uzyskane z przetwarzania zobrazowań SAR metodą PSInSAR wraz z dopasowaną linią trendu oraz obniżenia pionowe w funkcji czasu, pomierzone z wykorzystaniem klasycznych pomiarów geodezyjnych, na reperze nr 2242, zlokalizowanym w północnej części filara ochronnego Śródmieścia Bytomia (opracowanie własne). .....	93
<b>Rys. 5.34.</b> Wykres przedstawiający przemieszczenia powierzchni w kierunku LOS w funkcji czasu uzyskane z przetwarzania zobrazowań SAR metodą PSInSAR wraz z dopasowaną linią	

trendu oraz obniżenia pionowe w funkcji czasu, pomierzone z wykorzystaniem klasycznych pomiarów geodezyjnych, na reperze nr 2245, zlokalizowanym w północnej części filara ochronnego Śródmieścia Bytomia (opracowanie własne). ..... 93

**Rys. 5.35.** Wykres przedstawiający przemieszczenia powierzchni w kierunku LOS w funkcji czasu uzyskane z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR wraz z dopasowaną linią trendu oraz obniżenia pionowe w funkcji czasu, pomierzone z wykorzystaniem klasycznych pomiarów geodezyjnych, na reperze nr 2252, zlokalizowanym w północnej części filara ochronnego Śródmieścia Bytomia (opracowanie własne). ..... 94

**Rys. 6.1.** Wykres przedstawiający wielkość niedoszacowania wyników SBAS ( $\Delta w$  [mm]) w odniesieniu do prędkości obniżenia się powierzchni ( $v$  [mm/miesiąc]) obliczonej na podstawie pomiarów geodezyjnych (opracowanie własne). ..... 96

**Rys. 6.2.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast, wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu (opracowanie własne). ..... 97

**Rys. 6.3.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast, wzdłuż ul. Węglowej w Bieruniu (opracowanie własne). ..... 98

**Rys. 6.4.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Bobrek – Piekary Ruch Bobrek, wzdłuż ul. Karbowskiej w Bytomiu (opracowanie własne). ..... 98

**Rys. 6.5.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym ZG EKO – PLUS Sp. z o. o., wzdłuż ul. Celnej w Bytomiu (opracowanie własne). ..... 99

**Rys. 6.6.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym ZG EKO – PLUS Sp. z o. o., na południe od autostrady A1, rejon ul. Celnej w Bytomiu (opracowanie własne). ..... 99

**Rys. 6.7.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym ZG EKO – PLUS Sp. z o. o., na północ od autostrady A1, rejon ul. Celnej w Bytomiu (opracowanie własne). ..... 100

**Rys. 6.8.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK ROW Ruch Marcel, wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach (opracowanie własne). ..... 100

**Rys. 6.9.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Ruda Ruch Pokój, wzdłuż ul. 1-go Maja w Rudzie Śląskiej (opracowanie własne)... 101

- Rys. 6.10.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka, wzdłuż ul. Pszczyńskiej w Jastrzębiu Zdroju (opracowanie własne)..... 101
- Rys. 6.11.** Zależność pomiędzy prędkością obniżania się powierzchni, a wielkością niedoszacowania wyników SBAS dla punktu nr 82 zlokalizowanego na linii pomiarowej wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu (opracowanie własne)..... 103
- Rys. 6.12.** Obniżenia powierzchni zmierzone w okresie 11.2020 – 11.2021, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu, zmierzone klasyczną niwelacją geodezyjną (linia ciągła) oraz wyznaczone z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS skorygowane metodą zależności liniowych (linia przerywana) (opracowanie własne). ..... 104
- Rys. 6.13.** Obniżenia powierzchni zmierzone w okresie 11.2020 – 11.2021, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu, zmierzone klasyczną niwelacją geodezyjną (linia ciągła) oraz ostateczne obniżenia wyznaczone z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS skorygowane metodą zależności liniowych (linia przerywana) (opracowanie własne)..... 105
- Rys. 6.14.** Diagram przedstawiający tok postępowania wyznaczania dużych deformacji w warunkach GZW metodą zależności liniowych (opracowanie własne)..... 106
- Rys. 6.15.** Porównanie obniżenia powierzchni zmierzonego klasycznymi metodami geodezyjnymi (linie ciągłe) z obniżeniem uzyskanym z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS skorygowanym metodą zależności liniowych (linie przerywane) w poszczególnych cyklach pomiarowych, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Bobrek – Piekary Ruch Bobrek wzdłuż ul. Karbowskiej w Bytomiu; różnice wyrażono w postaci RMSE [mm] (opracowanie własne). ..... 108
- Rys. 6.16.** Porównanie obniżenia powierzchni zmierzonego klasycznymi metodami geodezyjnymi (linie ciągłe) z obniżeniem uzyskanym z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS skorygowanym metodą zależności liniowych (linie przerywane) w okresie 07.2015 – 07.2018, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK ROW Ruch Marcel wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach - część I; różnice wyrażono w postaci RMSE [mm] (opracowanie własne)..... 108
- Rys. 6.17.** Porównanie obniżenia powierzchni zmierzonego klasycznymi metodami geodezyjnymi (linie ciągłe) z obniżeniem uzyskanym z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS skorygowanym metodą zależności liniowych (linie przerywane) w okresie 07.2015 – 09.2021, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK ROW Ruch Marcel wzdłuż ul. Wyzwolenia w Markłowicach - część II; różnice wyrażono w postaci RMSE [mm] (opracowanie własne)..... 109
- Rys. 6.18.** Porównanie obniżenia powierzchni zmierzonego klasycznymi metodami geodezyjnymi (linie ciągłe) z obniżeniem uzyskanym z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS skorygowanym metodą zależności liniowych (linie przerywane) w poszczególnych cyklach pomiarowych, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK „Borynia – Zofiówka” Ruch Zofiówka wzdłuż ul. Pszczyńskiej w Jastrzębiu Zdroju; różnice wyrażono w postaci RMSE [mm] (opracowanie własne). ..... 109

- Rys. 6.19.** Porównanie obniżenia powierzchni zmierzonego klasycznymi metodami geodezyjnymi (linie ciągłe) z obniżeniem uzyskanym z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS skorygowanym metodą zależności liniowych (linie przerywane) w poszczególnych cyklach, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu; różnice wyrażono w postaci RMSE [mm] (opracowanie własne)..... 110
- Rys. 6.20.** Porównanie obniżenia powierzchni zmierzonego klasycznymi metodami geodezyjnymi (linie ciągłe) z obniżeniem uzyskanym z przetwarzania obrazów SAR metodą SBAS skorygowanym metodą zależności liniowych (linie przerywane) w poszczególnych cyklach, na linii pomiarowej zlokalizowanej na terenie górniczym KWK Piast – Ziemowit Ruch Piast wzdłuż ul. Węglowej w Bieruniu; różnice wyrażono w postaci RMSE [mm] (opracowanie własne)..... 110
- Rys. 7.1.** Lokalizacja wytypowany obszarów porównawczych (czarne kontury) w granicy GZW (czerwona linia) na tle mapy przedstawiającej pionowe przemieszczenia powierzchni w okresie 07.03.2015 – 13.03.2022 wyznaczone metodą SBAS – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne)..... 116
- Rys. 7.2.** Mapa pionowych przemieszczeń powierzchni wyznaczonych metodą SBAS, spowodowanych eksploatacją górniczą ściany 373a w pokładzie 209 w. II (czerwony kontur) w okresie 06.2020 – 11.2021 (opracowanie własne). ..... 117
- Rys. 7.3.** Wyniki dopasowania modelu do obniżeń pomierzonych na pierwszej linii pomiarowej (Dokumentacja GIG 2022)..... 118
- Rys. 7.4.** Wyniki dopasowania modelu do obniżeń pomierzonych na drugiej linii pomiarowej (Dokumentacja GIG 2022)..... 118
- Rys. 7.5.** Lokalizacja ściany 373a w pokładzie 209 warstwa II przed skorygowaniem niecki obniżeniowej (kolor czerwony) oraz po skorygowaniu niecki obniżeniowej (kolor czarny) ze względu na nachylenie pokładu oraz obrzeże eksploatacyjne na tle obniżeń wyznaczonych metodą SBAS (opracowanie własne)..... 119
- Rys. 7.6.** Piksele (czarne punkty) demonstrujące zasięg niecki obniżeniowej powstałej na skutek eksploatacji ściany 373a (linia czarna) KWK Piast - Ziemowit wraz z liniami demonstrującymi kierunek pomiaru zasięgu od piksela do ściany eksploatacyjnej (linia fioletowe) – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne)..... 120
- Rys. 7.7.** Piksele (czarne punkty) demonstrujące zasięg niecki obniżeniowej powstałej na skutek eksploatacji ściany 6 (linia czarna) KWK Bobrek - Piekary wraz z liniami demonstrującymi kierunek pomiaru zasięgu od piksela do ściany eksploatacyjnej (linie fioletowe) – układ PL2000/6, EPSG:2177..... 121
- Rys. 7.8.** Schemat zastosowanej metodyki do określenia średniego zasięgu deformacji górniczych w GZW (opracowanie własne)..... 124
- Rys. 7.9.** Wykres przedstawiający wyniki pierwszej, wstępnej analizy zasięgu deformacji opartej na danych niepoddanych filtracji, wraz z kryteriami przyjętymi do pierwszej filtracji danych (czerwone linie) (opracowanie własne). ..... 126

<b>Rys. 7.10.</b> Wykres przedstawiający wyniki analizy zasięgu deformacji opartej na danych po I filtracji, wraz z kryteriami przyjętymi do II filtracji danych (czerwone linie) (opracowanie własne). .....	127
<b>Rys. 7.11.</b> Wykres przedstawiający wyniki analizy zasięgu deformacji opartej na danych po II filtracji, wraz z obliczonym średnim zasięgiem deformacji górniczych (czerwona linia) (opracowanie własne).....	128
<b>Rys. 8.1.</b> Rozmieszczenie reperów mierzonych w trakcie eksploatacji (fioletowe kwadraty) oraz po zakończeniu eksploatacji (pomarańczowe koła) wraz z lokalizacją ostatniej eksploatacji w pokładzie 510wd (niebieskie linie) w rejonie filara ochronnego Śródmieścia Bytomia – układ PL2000/6, EPSG:2177 (opracowanie własne). .....	129
<b>Rys. 8.2.</b> Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-4 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”). .....	130
<b>Rys. 8.3.</b> Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-34 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”). .....	130
<b>Rys. 8.4.</b> Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-284 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”). .....	131
<b>Rys. 8.5.</b> Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-321 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”). .....	131
<b>Rys. 8.6.</b> Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-772 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”). .....	132
<b>Rys. 8.7.</b> Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-821 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”). .....	132
<b>Rys. 8.8.</b> Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-827 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”). .....	133
<b>Rys. 8.9.</b> Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-863 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego śródmieścia Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”). .....	133

<b>Rys. 8.10.</b> Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-870 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).	134
<b>Rys. 8.11.</b> Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-1011 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).	134
<b>Rys. 8.12.</b> Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-1224 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).	135
<b>Rys. 8.13.</b> Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-1291 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).	135
<b>Rys. 8.14.</b> Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-1376 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).	136
<b>Rys. 8.15.</b> Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-1925 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).	136
<b>Rys. 8.16.</b> Obniżenia powierzchni w funkcji czasu zmierzone na reperze numer s-1950 zlokalizowanym w rejonie filara ochronnego średnicy Bytomia w latach 1949 – 2015 (opracowanie własne na podstawie danych pozyskanych z SRK S.A. Oddział KWK „Centrum”).	137
<b>Rys. 8.17.</b> Przykład wyznaczania obniżenia w kierunku LOS repera nr 1317 z punktów PS otrzymanych na drodze obliczeń metodą PSInSAR: a) w okresie I tj. 24.04.2015 – 30.04.2016; b) w okresie II tj. 30.04.2016 – 01.05.2017 – układ PL2000/6, EPSG_2177 (opracowanie własne).	142
<b>Rys. 8.18.</b> Przemieszczenia w kierunku LOS [mm] punktu pomiarowego nr 1317 w okresie od 24.05.2015 do 30.03.2022 wyznaczone metodą PSInSAR (opracowanie własne).	143
<b>Rys. 8.19.</b> Przemieszczenia w kierunku LOS [mm] punktu pomiarowego nr 2232 w okresie od 24.05.2015 do 30.03.2022 wyznaczone metodą PSInSAR (opracowanie własne).	143
<b>Rys. 8.20.</b> Przemieszczenia w kierunku LOS [mm] punktu pomiarowego nr 2242 w okresie od 24.05.2015 do 30.03.2022 wyznaczone metodą PSInSAR (opracowanie własne).	144
<b>Rys. 8.21.</b> Przemieszczenia w kierunku LOS [mm] punktu pomiarowego nr 2245 w okresie od 24.05.2015 do 30.03.2022 wyznaczone metodą PSInSAR (opracowanie własne).	144
<b>Rys. 8.22.</b> Przemieszczenia w kierunku LOS [mm] punktu pomiarowego nr 2252 w okresie od 24.05.2015 do 30.03.2022 wyznaczone metodą PSInSAR (opracowanie własne).	145



- Rys. 8.23.** Obniżenia w kierunku LOS [mm] punktu pomiarowego nr 2259 w okresie od 24.05.2015 do 30.03.2022 wyznaczone metodą PSInSAR (opracowanie własne)..... 145
- Rys. 8.24.** Metoda wyznaczania współczynnika czasu  $c$  z obniżeń w kierunku LOS, uzyskanych z przetwarzania zobrażeń SAR metodą PSInSAR (opracowanie własne) ..... 152
- Rys 8.25.** Przemieszczenia w kierunku LOS w funkcji czasu, na reperze nr 1317, wyznaczone metodą PSInSAR wraz z logarytmiczną linią trendu obniżeń (linia czerwona) oraz teoretycznym czasem zanikania deformacji: a) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane w trakcie eksploatacji (linia zielona przerywana); b) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane po zakończeniu eksploatacji (linia pomarańczowa przerywana); c) określonym w oparciu i pomiary InSAR wykonane po zakończeniu eksploatacji (linia granatowa ciągła) (opracowanie własne)..... 155
- Rys. 8.26.** Przemieszczenia w kierunku LOS w funkcji czasu, na reperze nr 2232, wyznaczone metodą PSInSAR wraz z logarytmiczną linią trendu obniżeń (linia czerwona) oraz teoretycznym czasem zanikania deformacji: a) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane w trakcie eksploatacji (linia zielona przerywana); b) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane po zakończeniu eksploatacji (linia pomarańczowa przerywana); c) określonym w oparciu i pomiary InSAR wykonane po zakończeniu eksploatacji (linia granatowa ciągła) (opracowanie własne)..... 155
- Rys. 8.27.** Przemieszczenia w kierunku LOS w funkcji czasu, na reperze nr 2242, wyznaczone metodą PSInSAR wraz z logarytmiczną linią trendu obniżeń (linia czerwona) oraz teoretycznym czasem zanikania deformacji: a) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane w trakcie eksploatacji (linia zielona przerywana); b) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane po zakończeniu eksploatacji (linia pomarańczowa przerywana); c) określonym w oparciu i pomiary InSAR wykonane po zakończeniu eksploatacji (linia granatowa ciągła) (opracowanie własne)..... 156
- Rys. 8.28.** Przemieszczenia w kierunku LOS w funkcji czasu, na reperze nr 2245, wyznaczone metodą PSInSAR wraz z logarytmiczną linią trendu obniżeń (linia czerwona) oraz teoretycznym czasem zanikania deformacji: a) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane w trakcie eksploatacji (linia zielona przerywana); b) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane po zakończeniu eksploatacji (linia pomarańczowa przerywana); c) określonym w oparciu i pomiary InSAR wykonane po zakończeniu eksploatacji (linia granatowa ciągła) (opracowanie własne)..... 156
- Rys. 8.29.** Przemieszczenia w kierunku LOS w funkcji czasu, na reperze nr 2252, wyznaczone metodą PSInSAR wraz z logarytmiczną linią trendu obniżeń (linia czerwona) oraz teoretycznym czasem zanikania deformacji: a) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane w trakcie eksploatacji (linia zielona przerywana); b) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane po zakończeniu eksploatacji (linia pomarańczowa przerywana); c) określonym w oparciu i pomiary InSAR wykonane po zakończeniu eksploatacji (linia granatowa ciągła) (opracowanie własne)..... 157
- Rys. 8.30.** Przemieszczenia w kierunku LOS w funkcji czasu, na reperze nr 2259, wyznaczone metodą PSInSAR wraz z logarytmiczną linią trendu obniżeń (linia czerwona) oraz teoretycznym czasem zanikania deformacji: a) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane w trakcie eksploatacji (linia zielona przerywana); b) określonym w oparciu o pomiary geodezyjne wykonywane po zakończeniu eksploatacji (linia pomarańczowa

przerywana); c) określonym w oparciu i pomiary InSAR wykonane po zakończeniu eksploatacji (linia granatowa ciągła) (opracowanie własne)..... 157

## Spis tabel

<b>Tab. 2.1.</b> Kategorie terenu górniczego w polskich warunkach górniczych (Kwiatek i in. 2000). .....	19
<b>Tab. 5.1.</b> Zestawienie wartości RMSE dla analizowanych linii pomiarowych. ....	82
<b>Tab. 5.2.</b> Wyniki analizy statystycznej dotyczącej wyboru odpowiedniej wartości dyspersji amplitudy do przetwarzania zobrażeń satelitarnych metodą PSInSAR. ....	85
<b>Tab. 5.3.</b> Zestawienie wartości RMSE dla poszczególnych reperów.....	94
<b>Tab. 6.1.</b> Średnia miesięczna prędkość obniżania się punktu nr 82, zlokalizowanego na linii pomiarowej wzdłuż ul. Warszawskiej w Bieruniu, w poszczególnych cyklach pomiarowych. .....	103
<b>Tab. 6.2.</b> Wartości RMSE oraz różnice w obniżeniu maksymalnym dla poszczególnych cykli pomiarowy wraz ze średnimi wartościami dla poszczególnych linii pomiarowych pomiędzy wynikami obniżeń otrzymanymi z pomiarów wykonanych klasycznymi metodami geodezyjnymi oraz z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS skorygowane metodą zależności liniowych. ....	111
<b>Tab. 6.3.</b> Porównanie wartości RMSE dla ostatnich cykli pomiarowych, obliczonych dla wyników otrzymanych z przetwarzania zobrażeń SAR metodą SBAS bez korygowania metodą zależności liniowych i z korygowaniem metodą zależności liniowych, odniesione do wyników z klasycznych pomiarów geodezyjnych. ....	113
<b>Tab. 7.1.</b> Błąd obliczonych deformacji metodą SBAS.....	125
<b>Tab. 8.1.</b> Wyznaczone współczynniki czasu $c$ z odchyleniem standardowym dla każdego repera mierzonego w trakcie trwania eksploatacji i obliczoną wartością średnią wraz z wartościami, które nie zostały wzięte do obliczeń ze względu na duże odchylenie standardowe (wartości przekreślone). ....	138
<b>Tab. 8.2.</b> Wyznaczone współczynniki czasu $c$ dla każdego repera mierzonego po zakończeniu eksploatacji wraz z obliczoną wartością średnią.....	139
<b>Tab. 8.3.</b> Wartości otrzymane w wyniku przeprowadzonej analizy statystycznej dotyczącej wyznaczenia promienia obszaru wokół reperów pomiarowych, z którego uśrednione zostaną obniżenia w kierunku LOS zanotowano na punktach PS. ....	141
<b>Tab. 8.4.</b> Wyznaczone współczynniki czasu $c$ z odchyleniem standardowym, dla poszczególnego repera, z pomiarów PSInSAR.....	146
<b>Tab. 8.5.</b> Wyznaczone modelowe funkcje opisujące trend obniżania się danego repera w czasie wraz z współczynnikiem determinacji. ....	147
<b>Tab. 8.6.</b> Wyznaczone współczynniki czasu $c$ na podstawie modelowych funkcji trendu określonych z obniżeń wyznaczonych metodą PSInSAR.....	148
<b>Tab. 8.7.</b> Współczynniki czasu $c$ , określone na podstawie obniżeń w kierunku LOS wyznaczonych metodą PSInSAR.....	153

**Tab. 8.8.** Czasu zanikania obniżeń w rejonie filara ochronnego Śródmieścia Bytomia  
wyznaczone na drodze przeprowadzonej analizy. .... 154